КАНАЛ

МОСКВА ВОЛГА

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ РАБОТЫ

1932 – 1937

СТРОЙИЗДАТ · 1941



Пролетарии всех стран, соединяйтесь!





СХЕМА
КАНАЛА
МОСКВА-ВОЛГА
УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ.
Плотина земляная
" бетонная
ГЭС
Однокамерный шлюз с насосной станцией
Водопр. канал в 1 нитку
" трубопр.
Пристань
р. Волга
р. Дубна
ИВАНЬКОВСКОЕ В-ЩЕ
Шлюз №1
БОЛЬШАЯ ВОЛГА
СОРЕВНОВАНИЕ
Шлюз №2
р. Дубна
УДАРНАЯ
ВЕРБИЛКИ
р. Сестра
р. Яхрома
ДМИТРОВ
ЯХРОМА
КЛИН
Шлюз №3
Шлюз №4
КОМСОМОЛЬСКАЯ
р. Яхрома
Шлюз №5
Шлюз №6
ИКША
р. Волгуша
ИКШИНСКОЕ В-ЩЕ
ПЕСТОВСКОЕ В-ЩЕ
р. Клязьма
ПЯЛОВСКОЕ В-ЩЕ
АКУЛОВСКОЕ В-ЩЕ
ИСТРИНСКОЕ В-ЩЕ
ПУШКИНО
КЛЯЗЬМИНСКОЕ В-ЩЕ
р. Уча
ПЛ им КУЙБЫШЕВА
ПИРОГОВО
р. Клязьма
р. Яуза
р. Сходня
ИСТРА
ХИМКИНСКОЕ В-ЩЕ
ЦЕНТР. РЕЧН. ВОКЗАЛ
Шлюз №7
Шлюз №8
р. Истра
р. Москва
СЕРЕБРЯН. БОР
ЗВЕНИГОРОД
Шлюз №9
МОСКВА
ШЛЮЗЫ №10 и 11
ПЕРЕРВА

НКВД СССР
БЮРО ТЕХНИЧЕСКОГО ОТЧЕТА О СТРОИТЕЛЬСТВЕ КАНАЛА
МОСКВА—ВОЛГА

КАНАЛ МОСКВА—ВОЛГА

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ РАБОТЫ

(ИТОГИ РАБОТЫ ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ)

1932—1937

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО СТРОИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
МОСКВА 1941 ЛЕНИНГРАД

Редакторы: канд. техн. наук инж. Н. П. РОЗАНОВ и инж. Н. П. ЗРЕЛОВ

В настоящем выпуске технического отчета описываются основные научно-исследовательские работы, проведенные гидротехнической лабораторией строительства канала Москва—Волга. Во введении дана краткая характеристика вообще всех научно-исследовательских работ, проведенных на Строительстве. Отдельная глава посвящена организации исследования сооружений в натуре как в период постройки, так и в начальный период эксплоатации.

Книга рассчитана на гидротехников-проектировщиков и научных работников.

В составлении настоящего выпуска технического отчета принимали участие: инженеры Т. М. ВАСИЛИШИН, Ю. Д. ГОРОДКОВ, А. И. КРЫЛОВ, Н. А. РЖАНИЦЫН, В. Ф. ТЕЙТЕЛЬМАН, А. А. УГИНЧУС и др. Редактирование проведено редакционной коллегией в составе: главного редактора дивинженера С. Я. ЖУК, зам. главного редактора проф. М. М. ГРИШИНА и членов: М. Н. ПОПОВА, В. Д. ЖУРИНА, А. И. БАУМГОЛЬЦ, В. А. СЕМЕНЦОВА и А. О. ВИЛЬДГРУБЕ.

Ответственные за выпуск:
зам. гл. редактора проф. М. М. ГРИШИН
и инж. Н. А. РЖАНИЦЫН.

При строительстве комплексных гидротехнических сооружений большую роль играет своевременная и правильная организация научно-исследовательских работ, подкрепляющих и обосновывающих выбор намечаемых практических мероприятий и дающих новое разрешение поставленных весьма сложных и ответственных задач.

«Если бы наука была такой, какой ее изображают некоторые наши консервативные товарищи, — говорил товарищ Сталин в речи на Первом всесоюзном совещании стахановцев, — то она давно погибла бы для человечества. Наука потому и называется наукой, что она не признает фетишей, не боится поднять руку на отживающее, старое и чутко прислушивается к голосу опыта, практики. Если бы дело обстояло иначе, у нас не было бы вообще науки, не было бы, скажем, астрономии, и мы все еще пробавлялись бы обветшалой системой Птоломея, у нас не было бы биологии, и мы все еще утешались бы легендой о сотворении человека, у нас не было бы химии, и мы все еще пробавлялись бы прорицаниями алхимиков» [1].

На строительстве канала Москва — Волга наука сразу же была призвана к разрешению практических задач на самой стройке [2]. Лаборанты, исследователи, теоретики по различнейшим дисциплинам были приглашены на строительство, чтобы здесь в теснейшем ежедневном контакте с проектировщиками и строителями, не увлекаясь отвлеченными теориями, совместными усилиями разрешить большую государственную задачу.

Опыт такой совместной работы исследователей и практиков, впервые примененный в столь крупных масштабах на строительстве канала Москва — Волга, в итоге вполне себя оправдал.

Ряд проблем, казавшихся вначале весьма сложными и трудно разрешимыми, получил на Строительстве канала вполне удовлетворительное и оригинальное решение лишь благодаря сочетанию теории и практики на базе организованных непосредственно на Строительстве научных исследований и лабораторных испытаний. Так, в результате теснейшей связи в работе проектировщиков, строителей и исследователей удалось найти правильное практическое разрешение ряда сложных вопросов гидротехники, гидравлики и гидромеханики, стоявших перед Строительством. Только благодаря возможности немедленной проверки в лаборатории теоретических подсчетов и соображений проектировщиков удалось сравнительно быстро и с учетом местных условий найти правильные решения при компоновке узлов и оптимальные формы и хорошее конструктивное решение для ряда сооружений, например водосливов, насосов и т. п.

В результате глубоких исканий, смелых дерзаний и упорной борьбы со старыми отживающими нормами и традициями общая задача, поставленная Партией и Правительством перед строителями канала, была разрешена полностью.

Настоящий выпуск отчета посвящен описанию результатов основных научно-исследовательских работ, проведенных на Строительстве канала. При этом ряд разделов, например исследовательские работы при бетонировании, гео-

---

[1] И. Сталин, Вопросы Ленинизма, изд. XI, стр. 502.

[2] См. также главу «Наука на службе строительства» в выпуске технического отчета «Канал Москва — Волга».

технические исследования, изучение и применение торфа в строительстве, как неразрывно связанные с производством работ, был выделен в специальные выпуски отчета[1].

Поэтому большую часть настоящего выпуска занимает описание лишь основных итогов работ гидротехнической лаборатории. Но и в этой части конкретные результаты работ пришлось отчасти связать с описанием выбора конструкций и типов отдельных сооружений, чему посвящены специальные выпуски «Гидротехнические сооружения», «Путевые сооружения» и др.

Кроме того специальная IX глава этого выпуска посвящена описанию организации на строительстве канала стационарных научных исследований и наблюдений за состоянием ответственнейших сооружений в процессе возведения и начального периода их эксплоатации. В таком масштабе, как на строительстве канала Москва — Волга, организация научных исследований и наблюдений за поведением сложных гидротехнических сооружений ставилась у нас впервые.

К сожалению приходится констатировать, что это ценнейшее и интереснейшее начинание Строительства вопреки прямым указаниям Правительственной комиссии не получило в первые 2 — 3 года эксплоатации канала должного развития: богатейший фактический материал, собранный еще в пусковой период, остался в основном несистематизированным и необработанным; научные исследования и наблюдения за сооружениями по оценке Правительственной комиссии 1939 г. были сильно запущены и находились в неудовлетворительном состоянии.

Между тем наличие в системе канала большого числа крупных и сложных гидротехнических сооружений оригинальной конструкции, впервые примененных в нашей строительной практике, делает надлежащую постановку научно-исследовательских работ по стационарным наблюдениям за поведением сооружений системы канала крайне полезной и необходимой не только для эксплоатации самого канала, но и для всех вообще проектировщиков и строителей аналогичных сооружений.

Результаты наблюдений за поведением главнейших сооружений канала в начальный пусковой период приведены при описании конструкций отдельных типов сооружений канала в выпусках «Путевые сооружения» и «Гидротехнические сооружения».

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

---

[1] См. выпуски «Бетонные работы», «Геотехника», «Торф в строительстве» и др.

ГЛАВА I

ВВЕДЕНИЕ

I. ОБЩИЙ ОБЗОР НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РАБОТ НА СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Научно-исследовательские работы на Строительстве канала Москва — Волга получили исключительно широкое развитие.

Короткие сроки, данные Строительству для проектирования и постройки, с одной стороны, и стремление к достижению возможно более высокого качества будущих сооружений — с другой, настоятельно требовали организации на строительстве собственной сети лабораторий, которые обеспечивали бы немедленное разрешение на месте ряда неотложных вопросов проектирования и строительства.

Отличительной чертой работы лабораторий Строительства являлась не только проверка на моделях качества запроектированных сооружений, но и отыскание в ряде случаев новых конструкций, более совершенных и экономичных.

При исследованиях наряду с запроектированными вариантами испытывались дополнительные варианты сооружений, выдвигаемые самими лабораториями. Существенные изменения в конструкциях, вытекавшие из произведенных испытаний, тут же согласовывались с конструкторами, что обеспечивало быстроту работы и хорошее ее качество.

Кроме разрешения практических вопросов лаборатории Строительства сыграли значительную роль в деле углубления и усовершенствования методов лабораторных исследований и расчетов, а также в деле более рационального использования строительных материалов.

На строительстве канала Москва — Волга функционировали следующие лаборатории: 1) гидротехническая, 2) бетонная, 3) грунтовая, 4) химическая, 5) лаборатория гидромеханизации и 6) установка по изучению пропеллерных насосов.

Кроме того для изучения узкоспециальных вопросов, например торфяных грунтов, гидроизоляции и др., при основных лабораториях были организованы соответствующие специальные группы.

Основные или так называемые центральные лаборатории, находившиеся в Дмитрове, имели на трассе полевые лаборатории и контрольные посты, а также опытные участки. Работа на опытных участках являлась продолжением исследовательских работ, начатых в лабораторной обстановке, с приближением их к производственным условиям. Такие опытные участки были организованы в частности по наблюдению за поведением торфяных дамб и креплений откосов канала, изучению волнового режима и т. п.

Из лабораторий Строительства большое развитие получила Центральная бетонная лаборатория, оборудованная мощными прессами и имевшая хорошо поставленное химическое отделение, холодильную камеру и прочие установки.

Центральная бетонная лаборатория Строительства провела большие исследования в области гидротехнического бетона с трепельными добавками, зимнего бетонирования, морозостойкости бетона и приготовления и укладки бетона

большими блоками при малых сроках укладки и различных способах вибрации бетона.

В лаборатории были произведены оригинальные работы (на больших кубах 2 × 2 × 2 *м*) по изучению экзотермии и начальных напряжений, возникающих в бетоне различных составов, и ряд других работ, имеющих большое научное значение.

Кроме того Центральная бетонная лаборатория Строительства осуществляла техническое руководство бетонными работами по всему строительству и контроль за выполнением этих работ в соответствии с преподанными инструкциями. При этом Центральной бетонной лабораторией были проведены испытания и исследования:

1) арматурного железа на разрыв		
сварных стыков	19 100	образцов
целых стержней	12 800	»
2) бетонной смеси на водопроницаемость	6 800	»
3) бетона на раздавливание	46 500	»
4) бетона на сопротивление совместному действию воды и мороза (25-кратным замораживанием и оттаиванием)	6 400	»
5) цемента — стандартные испытания	11 800	»
» — испытания на сроки схватывания	12 600	»
» — на равномерность изменений объема	12 800	»
е) гравия — полные испытания	2 900	»
ж) песка — полные испытания	2 800	»
» — проверки загрязненности и влажности	15 500	»
и многие другие.		

По заключению Правительственной приемочной комиссии Центральная бетонная лаборатория Строительства канала играла инициативную и ведущую роль в деле постановки и организации бетонных работ. Ею же были составлены все необходимые инструкции по производству бетонных, арматурных и гидроизоляционных работ.

По инициативе и под руководством Центральной бетонной лаборатории на Строительстве канала был впервые произведен в большом масштабе опыт пуццоланизации бетона на стройке путем присадки в него трепела в виде трепельно-водной суспензии, вводимой в барабан бетономешалки. Эта добавка трепела повышала качество бетона в отношении плотности и сопротивляемости его агрессивным водам и вместе с тем давала возможность сократить расход цемента.

Второй крупной заслугой Центральной бетонной лаборатории Строительства, также отмеченной Правительственной приемочной комиссией, являлось применение (тоже впервые в Союзе в столь крупных масштабах) укладки бетона с применением вибраторов.

Одновременное применение в широком масштабе трепела и вибраторов для бетона снизило средний расход цемента на Строительстве до 211 — 212 *кг/м*³, который при обычном бетоне и ручном трамбовании составлял бы не менее 270 — 300 *кг/м*³. Вследствие этого экономия цемента на некоторых сооружениях достигала 20 — 30%, а в среднем по всему строительству — 15 — 20%.

«Надо думать — говорится в сводном заключении группы бетонных работ гидротехнической секции Правительственной приемочной комиссии, — что пуццоланизация цемента и вибрирование бетона, основываясь на успешном опыте Москваволгостроя, найдут широкое применение как на работах, руководимых в дальнейшем работниками Строительства, так и на других стройках».

Большая теоретическая работа, проведенная Центральной бетонной лабораторией Строительства, наряду с оперативным техническим руководством непосредственно на трассе, на производстве, позволила поставить, а частично уже и разрешить ряд актуальнейших проблем бетонного хозяйства (вопросы пуццо-

ланизации бетонов малоактивными гидравлическими добавками — «мокрой присадкой» и др.)[1].

Весьма большая научно-исследовательская работа была проведена на Строительстве канала Москва — Волга и геотехническим отделом Строительства и входившей в его состав грунтовой лабораторией.

Следует отметить однако, что на Строительстве канала Москва — Волга вопросы геотехники и методические приемы их разрешения пришлось разрабатывать в большинстве случаев параллельно с проводившимся строительством и только частично на основе опыта, накапливаемого в процессе строительства. Поэтому широкого практического применения на самой стройке многие работы по геотехнике получить не могли и явились лишь базой и полезным материалом для проектирования и строительства дальнейших крупных сооружений III пятилетки (Волгострой, строительство Куйбышевского гидроузла на Волге и др.).

Среди ряда методических работ, проведенных на Строительстве канала геотехническим отделом и грунтовой лабораторией, следует особо отметить:

1) определение прочности грунта в основаниях сооружений, т. е. его несущей способности;

2) оценки устойчивости откосов земляных сооружений, экранов, плотин и т. п.;

3) оценка возможных усадок сооружений;

4) оценка самоуплотнения насыпей;

5) приемы назначения и контроля уплотнения насыпей и др.

Большое разнообразие геологических и грунтовых условий различных сооружений канала и весьма значительный объем земляных работ, подлежавших проведению в связи с возведением высокоответственных насыпей и дамб, побудили Строительство к организации тщательного контроля за отбором и укладкой грунтов в сооружения. Организация такого контроля Центральной грунтовой лабораторией Строительства, а также сетью районных грунтовых лабораторий и контрольных постов на трассе дала возможность: 1) сочетать высокую производительность работ с высоким качеством, 2) использовать большинство местных грунтов с наилучшим экономическим и техническим эффектом и 3) применить для строительства дамб, понуров и экранов не только минеральные, но и местные торфяные грунты в различных комбинациях с минеральными.

За время постройки канала Москва — Волга грунтовыми лабораториями Строительства проделано было около 150 000 анализов грунтов[2].

В 1933 г. в связи с выявившейся необходимостью широкого использования на строительстве торфа как несущего основания, строительного и противофильтрационного материала и как постели под каменную наброску для крепления откосов в составе геотехнического отдела было организовано специальное торфяное отделение. Последним за период постройки канала были выполнены следующие работы:

1. Произведено научно-техническое обследование 22 болот, пересекаемых трассой канала, общим протяжением в 29,5 *км* и 20 торфяных болот в прикаральной полосе и в районе водохранилищ.

2. При исследовании произведено бурение торфяной залежи в количестве свыше 20 000 *пог. м* и взято для анализа более 13 000 образцов торфа из 6 000 пунктов. В трех торфяных лабораториях Строительства (одна — в Дмитрове и две — на трассе) произведено свыше 40 000 анализов. При этом многие из них (определение угла сдвига и внутреннего трения, пластичность) выполнялись впервые в Союзе в лаборатории Строительства в большом масштабе.

[1] Описанию имевших место в связи с этим научно-исследовательских исканий и проработок посвящена первая часть специального выпуска технического отчета «Бетонные и железобетонные работы на строительстве канала Москва — Волга» — «Постановка и результаты научно-исследовательских работ Центральной бетонной лаборатории строительства».

[2] Результаты работ геотехнического отдела и грунтовой лаборатории Строительства подробно изложены в специальном выпуске технического отчета «Геотехника на строительстве канала Москва — Волга» и в разделе *V* выпуска «Земляные работы на строительстве канала Москва — Волга» — «Уплотнение насыпей».

3. Для опытного наблюдения за поведением отсыпанных в натуральную величину торфяных дамб на торфяном основании на трассе канала организованы два опытных участка.

4. Теоретическим и экспериментальным путем разработаны вопросы: о пределах осадок торфяных оснований и торфяных дамб; о степени разложения торфа, обеспечивающей получение надлежащей величины коэфициента фильтрации для строительного и противофильтрационного торфа ($k = 0{,}0000\ A$ *см/сек*); о влиянии промерзания торфа на изменение его физических свойств после оттаивания и т. п.

Результаты проведенных исследований, использованные в практике Строительства, выходят по своему значению далеко за его пределы и могут и должны быть широко применены и на других аналогичных стройках. В связи с этим и ввиду отсутствия у нас специальной литературы, освещающей подобного рода вопросы, им посвящен самостоятельный выпуск технического отчета «Торф на строительстве канала Москва — Волга».

Кроме проведения указанных работ на строительстве канала Москва — Волга впервые в нашем Союзе широкое развитие получил и новый способ разработки грунтов гидромеханизацией; поэтому в специальной лаборатории гидромеханизации были поставлены соответствующие научно-исследовательские работы, которыми охвачены в основном следующие три раздела:

1) испытание механизмов, применяемых при гидромеханизации, — насосов и землесосов;

2) гидротранспорт пульпы (изучение потерь напора в трубах при транспортировании по ним пульпы);

3) гидравлические исследования по изучению потерь напора при движении чистой воды по резиновым шлангам и потерь напора в гидромониторах Гидроторфа и Союззолота [1].

Химической лабораторией Строительства, существовавшей вначале при гидротехнической, а впоследствии при бетонной лаборатории, были проведены большие исследования качества воды в Волге и Москва-реке, грунтовых вод на трассе канала в местах расположения всех бетонных сооружений, а также проведено изучение битумной гидроизоляции для всех бетонных и некоторых земляных сооружений канала. В частности ею была предложена и внедрена на строительстве замена дорогих материалов — битума и оцинкованного железа — более дешевыми — битумно-минеральными смесями и обыкновенным листовым железом, покрашенным битумным раствором.

Пробы воды брались химической лабораторией Строительства в 28 характерных пунктах Москва-реки — от Коломны до Кунцева на протяжении 180 *км*. Пробы эти подвергались химическому анализу на кислород и биохимическую потребность. На их основе был вычислен для Москва-реки коэфициент аэрации, позволивший определить необходимые попуски воды из канала в Москва-реку для удовлетворения санитарных требований.

В результате подробных исследований химической лабораторией Строительства были впервые составлены новые рецепты:

1) битумных матов для защиты сооружений канала от повреждений грунтовыми водами, матов в основании бетонных сооружений и битумно-бензинных окрасок;

2) парафино-канифольного покрытия (примененного на Перервинском шлюзе), служащего одновременно гидроизоляцией и окраской;

3) составов для защиты металла подводных поверхностей от коррозии (из 75% битума и 25% бензина) и специальных красок для подводных поверхностей.

Чрезвычайно большое практическое значение получили проведенные на строительстве, а также по поручению последнего на заводе «Борец», научно-

---

[1] Результаты исследований приведены в выпуске технического отчета «Гидромеханизация на строительстве канала Москва — Волга».

исследовательские работы по изысканию и конструированию наиболее совершенного типа насосных агрегатов для подъема волжской воды в водораздельный бьеф канала. Результаты этих работ [1] дали возможность сконструировать и установить на канале самые мощные и совершенные в мире насосы пропеллерного типа с коэфициентом полезного действия бо̀льшим, чем у насосов заграничных фирм.

Исключительно большое значение приобрела в процессе проектирования и возведения сооружений канала и гидротехническая лаборатория Строительства. Необходимо подчеркнуть, что без собственной гидротехнической лаборатории, организованной непосредственно в центре строительства, многие впервые примененные на Строительстве канала весьма ценные конструктивные усовершенствования и рационализаторские предложения едва ли могли бы быть выдвинуты и применены. Краткому изложению итогов работ гидротехнической лаборатории Строительства в основном и посвящается настоящий выпуск отчета.

Совершенно новым и впервые примененным в подобном масштабе является организованное Управлением Строительства еще в процессе возведения сооружений научно-исследовательское наблюдение и изучение поведения возводимых сооружений как во время постройки, так и в период эксплоатации (в особенности в течение первоначального периода). Описанию организации этого рода научно-исследовательской деятельности строительства и посвящена последняя IX глава настоящего выпуска технического отчета.

2. ОРГАНИЗАЦИЯ ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ СТРОИТЕЛЬСТВА

В практике проектирования комплекса гидротехнических сооружений часто приходится встречаться с целым рядом вопросов, связанных со сложными гидравлическими явлениями. При этом, несмотря на значительные успехи в области гидравлики и гидротехники, современное состояние этих наук все еще не позволяет разрешить многих вопросов, встречающихся при проектировании гидротехнических сооружений, путем теоретических и технических расчетов; для разрешения их требуется опытно-экспериментальная проверка.

Исследовательская работа, поставленная в гидротехнических лабораториях, дает возможность анализировать явления природы, расчленяя их на отдельные элементы. Правильно и продуманно поставленные лабораторные опыты разрешают многие из вопросов, не поддающихся теоретическим расчетам. Поэтому за последние годы в широких кругах строителей-гидротехников прочно укрепилось мнение, что постройке более или менее значительных гидротехнических сооружений должны предшествовать соответствующие исследования в гидротехнических лабораториях. Затраты на лабораторные исследования всегда с избытком окупают себя за счет получаемых в результате проведенных опытов строительной экономии и надежной работы сооружений в период их эксплоатации.

На строительстве канала Москва — Волга уже в самом начале проектных работ возникла необходимость в постановке детальных лабораторных исследований сооружений канала и организации собственной гидротехнической лаборатории.

Так, при проектировании гидротехнических сооружений с напорами до 28 *м* и расходами до 54 *м*^{3}/*сек* на 1 *пог. м* водосбросного фронта, расположенных на слабых основаниях, такие вопросы, как гашение кинетической энергии в нижнем бьефе, могли быть разрешены надлежащим образом только с помощью лабораторных исследований.

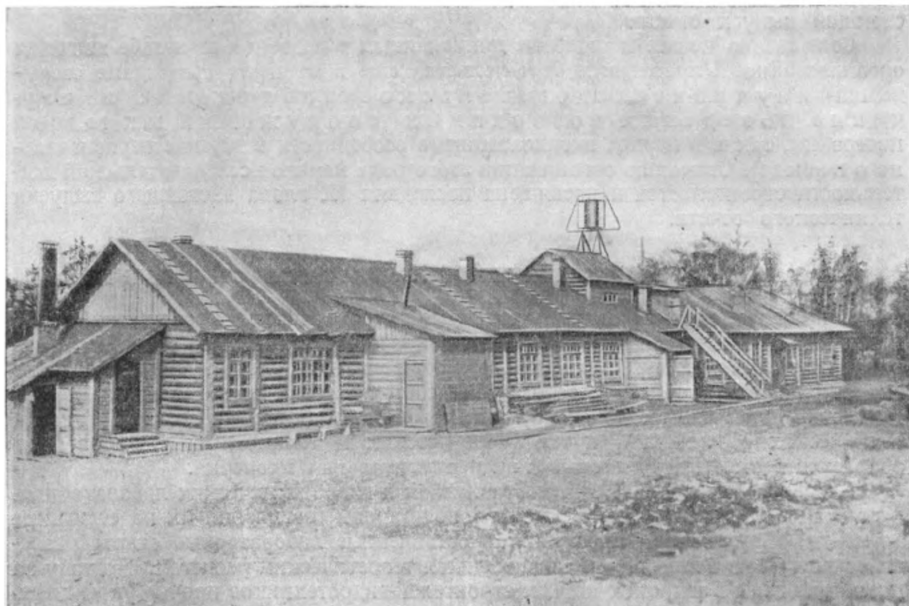
К числу вопросов, разрешаемых лишь при помощи лабораторных исследований, относятся также следующие вопросы: пропуск льда через сооружения; определение пропускной способности сооружений; установление очертаний обтекаемых поверхностей сооружений и распределение давлений на них; подбор

---

[1] См. общий выпуск отчета «Канал Москва — Волга».

безвакуумных профилей; определение величин давлений напорных вод под фундаментами сооружений и распределение этих давлений по контуру сооружений; подбор рациональных устройств для наполнения и опорожнения шлюзных камер; установление рационального порядка эксплоатации сооружений; последовательность маневрирования затворами при различных расходах и горизонтах воды и т. д.

Так как существовавшие в Союзе лаборатории различных организаций не могли обеспечить испытания необходимых для канала сооружений в нужные для строительства сроки, то в 1932 г. было приступлено к организации собственных лабораторных исследований непосредственно на строительстве, временно в помещении маленькой деревянной лаборатории (фиг. 2), перевезенной со строительства Беломорско-Балтийского канала им. Сталина (с общим расходом



Фиг. 2. Временная гидротехническая лаборатория строительства канала Москва — Волга

всех насосных установок $Q \approx 35$ *л/сек*). Одновременно с этим была запроектирована новая, более мощная лаборатория (фиг. 3) с пятью гидравлическими установками и общим расходом воды $Q = 400$ *л/сек*, построенная к концу 1933 г.

В первый период строительства из технического отдела в лабораторию поступали только законченные проекты сооружений, в которые на основании своих исследований лаборатория вносила изменения. Так, в результате исследований гидротехнической лаборатории во многих водоспусках были сокращены размеры водобойных колодцев и улучшены формы водосливов и система гасителей энергии; на одной из плотин (№ 11) изменено направление отводящего канала и сокращена его длина; применено устройство козырька в сегментных затворах верхних голов шлюзов; отменена бетонная облицовка ковша водопроводного канала; сокращена длина понура земляной плотины № 2 и некоторых других плотин [1]; у насосных станций отменены некоторые дренажи и т. д. Можно сказать, что почти во все сооружения, подвергавшиеся испытанию в лаборатории,

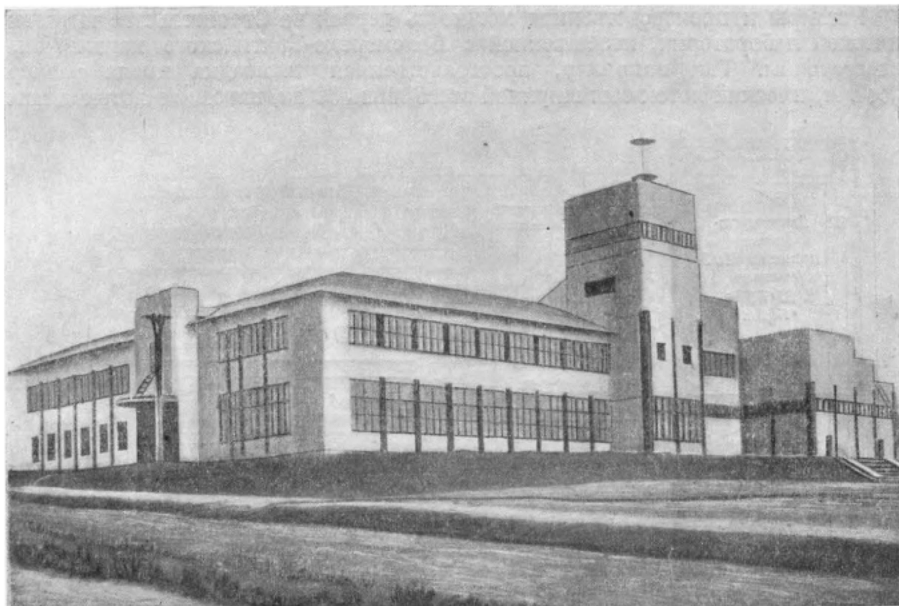
---

[1] См. выпуск технического отчета «Гидротехнические сооружения».

были внесены те или иные изменения, что дало значительную экономию средств по строительству и улучшило качество сооружений.

Однако в этот период в лабораторию поступали иногда задания не в виде законченных проектов, а лишь в виде схем сооружений. В этих случаях лаборатории приходилось не только вести испытания сооружений, но и разрабатывать самые основы проекта, увязывая его в конструктивной части с Проектным отделом. Этот метод, так называемый метод лабораторного проектирования, получил на Строительстве широкое применение и вполне оправдал себя, так как давал возможность сокращать сроки проектирования, не снижая его качества.

Всего в гидротехнической лаборатории было проработано 180 тем, в том числе несколько весьма крупных, например компоновка узлов сооружений: Волжского, Перервинского, Карамышевского. При этом целый ряд вопросов



Фиг. 3. Общий вид новой гидротехнической лаборатории строительства канала Москва — Волга

разрабатывался в практике гидротехнического строительства впервые, и гидротехнической лаборатории приходилось не только производить исследования, но и разрабатывать самую методику их производства.

Помимо экспериментальных исследований лабораторией был разработан и ряд теоретических вопросов, как-то: теория вырывания потоком бетонных плит, теория заградительных ворот с всплывающим затвором и т. д., а также выполнены некоторые производственные задания, например по вопросам гидромеханизации (транспортирование пульпы и определение коэфициента полезного действия гидроэлеватора) и по исследованию условий производства работ в части возведения каменного банкета наброской камня в текущую воду на плотине № 6. Для плотины № 9 в частности исследовался вопрос об оставлении шпунтовых перемычек и о влиянии старой плотины на размыв за рисбермой.

В результате лабораторных исследований Строительством была получена довольно значительная экономия денежных средств, оцениваемая в несколько десятков миллионов рублей.

Проектирование и изготовление отделением точных приборов лаборатории измерительной аппаратуры и разных приборов для нее же и других отделов

Строительства, равно как и ремонт геодезических приборов для отдела топографических изысканий, также дали существенную пользу.

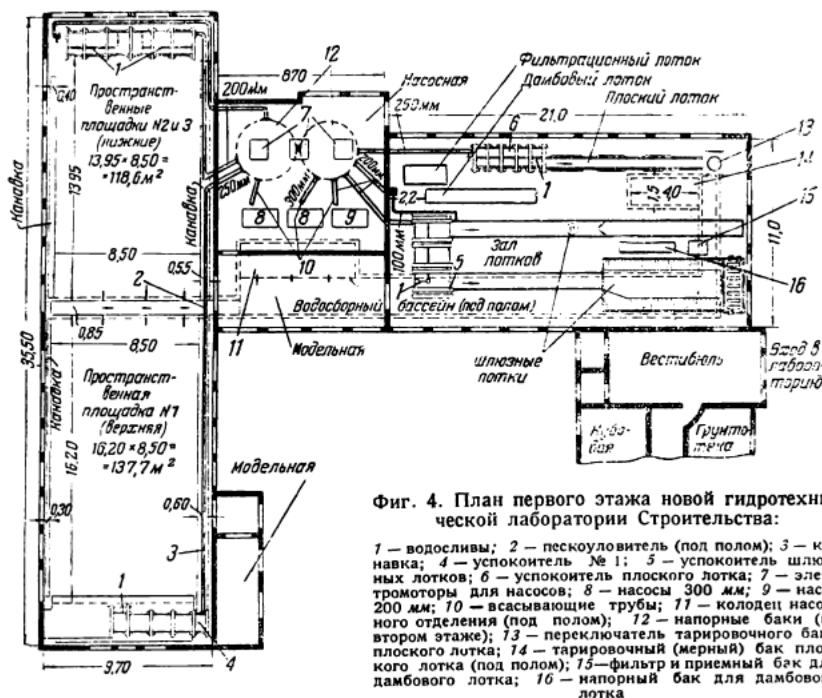
Вместе с тем результаты работы лаборатории дали строителям определенную уверенность в надежности возводимых сооружений, причем опыт уже нескольких лет эксплоатации сооружений канала и пропуска через них весенних паводков показал, что эта уверенность была вполне обоснованной.

ГЛАВА II

ГИДРОТЕХНИЧЕСКАЯ ЛАБОРАТОРИЯ, ЕЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА

I. ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРИИ

Размеры и производственная мощность первой на Строительстве гидротехнической лаборатории, перевезенной с Беломорско-Балтийского канала, были недостаточны. Так например, пространственная площадка имела размеры 4 × 8 *м*, плоский лоток был шириной всего лишь 30 *см*, шлюзной лоток длиной



Фиг. 4. План первого этажа новой гидротехнической лаборатории Строительства:

1 — водосливы; *2* — пескоуловитель (под полом); *3* — канавка; *4* — успокоитель № 1; *5* — успокоитель шлюзных лотков; *6* — успокоитель плоского лотка; *7* — электромоторы для насосов; *8* — насосы 300 *мм*; *9* — насос 200 *мм*; *10* — всасывающие трубы; *11* — колодец насосного отделения (под полом); *12* — напорные баки (во втором этаже); *13* — переключатель тарировочного бака плоского лотка; *14* — тарировочный (мерный) бак плоского лотка (под полом); *15* — фильтр и приемный бак для дамбового лотка; *16* — напорный бак для дамбового лотка

до 8 *м* не имел успокоителя; кроме того все эти установки размещались в одном общем зале 10,75 × 7,5 *м*, что создавало крайнюю тесноту и большие неудобства в работе. Все это позволяло проводить исследования только в малых масштабах (1 : 150 — 1 : 200) и конечно не обеспечивало выполнения требований, предъявляемых к намеченным исследованиям, и совершенно исключало возможность постановки ответственных исследований основных сооружений канала, в особенности узлов сооружений — Волжского, Карамышевского и Перервинского.

Поэтому с развитием проектных работ необходимость срочной постройки нового здания лаборатории встала особенно остро, и в 1932 г. был составлен

проект новой гидротехнической лаборатории, соответствующей потребностям Строительства. Строительные и монтажные работы по лаборатории были закончены к концу 1933 г.

В состав новой Гидротехнической лаборатории (фиг. 3) входили следующие экспериментальные установки (фиг. 4):

1) большая пространственная площадка 16,2 × 8,5 *м* (площадка № 1);

2) пространственная площадка 14,0 × 8,5 *м*, приспособленная для параллельного исследования двух моделей (площадки № 2 и 3);

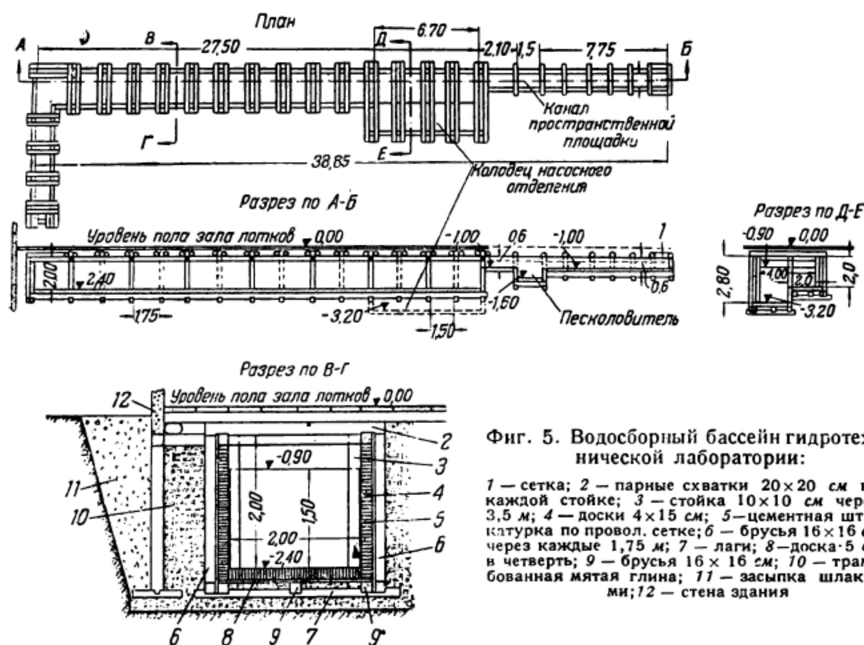
3) плоский лоток;

4) система шлюзных лотков;

5) фильтрационные установки..

В центре лаборатории размещались насосная станция и водонапорные баки. Для удобства обслуживания экспериментальных установок модельная мастерская была расположена в центре лаборатории. В левой части, примыкающей к насосной, были расположены пространственные площадки, а в правой— лотки.

Второй этаж лаборатории и правое крыло (на фиг. 4 показанное неполностью) было предназначено для размещения грунтовых, фильтрационных и химических установок; во втором этаже находились и рабочие комнаты бригад.



Фиг. 5. Водосборный бассейн гидротехнической лаборатории:

1 — сетка; *2* — парные схватки 20×20 *см* на каждой стойке; *3* — стойка 10×10 *см* через 3,5 *м*; *4* — доски 4×15 *см*; *5*—цементная штукатурка по провол. сетке; *6* — брусья 16×16 *см* через каждые 1,75 *м*; *7* — лаги; *8*—доска·5 *см* в четверть; *9* — брусья 16 × 16 *см*; *10* — трамбованная мятая глина; *11* — засыпка шлаками; *12* — стена здания

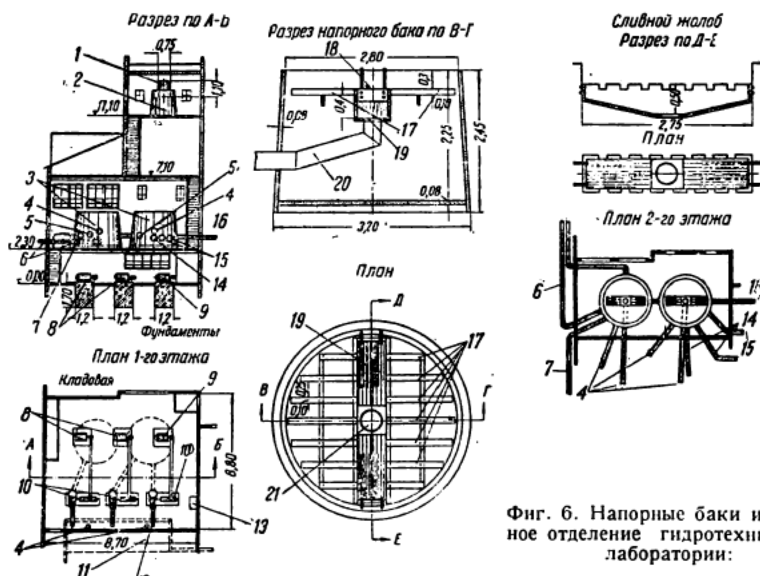
Хотя принятая схема лаборатории имела ряд недостатков, однако она все же достаточно удовлетворительно разрешала вопрос о круговороте воды в лаборатории и обеспечивала удобное обслуживание рабочих установок модельной мастерской.

Весь технологический процесс лаборатории был построен на внутреннем круговороте воды с созданием местного водоема, который обеспечивал бесперебойность работы всех установок. Таким водоемом служил водосборный бассейн объемом 120 $м^3$, расположенный в плане в виде Г-образного лотка сечением (в основной части) 2,0 × 2,0 *м* под залом лотков и модельной мастерской.

Основная конструкция этого лотка — деревянная в виде рам. Стенки и днище выполнены из досок (фиг. 5), положенных плашмя. Внутренняя поверхность покрыта цементной штукатуркой с железнением.

Объем водосборного бассейна был рассчитан таким образом, чтобы при откачке из него воды для заполнения всех установок, моделей на них, успокоителей и пр. в нем оставался еще запас воды, достаточный для работы насосной станции лаборатории.

Из приемного колодца (ковша) насосной станции, расположенного под модельной мастерской, вода тремя центробежными насосами (два насоса по 300 *мм*, $Q = 160$ *л/сек* и один в 200 *мм*, $Q = 80$ *л/сек*) подавалась в два деревянных напорных бака (фиг. 6), расположенных над насосами. Баки были снабжены развитой системой водосливных лотков для поддержания постоянного горизонта



Фиг. 6. Напорные баки и насосное отделение гидротехнической лаборатории:

1 — бак для испытания торфа; *2* — бак для водоснабжения *3* — напорные баки; *4* — сливные шланги 300 *мм*; *5* — нагнетательные шланги 300 *мм*; *6* — трубы 200 *мм* к пространственным площадкам № 2 и 3; *7* — труба 250 *мм* к площадке № 1; *8* — электромоторы 29 *квт*; *9* — электромоторы 14,5 *квт*; *10* — центробежные насосы 300 *мм* — 160 *л/сек* и 200 *мм* — 80 *л/сек*; *11* — колодец водосборного бассейна; *12* — всасывающие шланги; *13* — распределительный щит; *14* — нагнетательные шланги 200 *мм*; *15* — трубы 200 *мм* к шлюзному лотку; *16* — труба 250 *мм* к плоскому лотку; *17* — сливные лотки; *18* — уровень слива; *19* — сливной жолоб; *20* — шланг с коленом к сливной трубе; *21* — отверстие для сливной трубы.

и следовательно напора воды на установках. Из напорных баков по системе труб диаметром 200 — 250 *мм* вода поступала на установки и, пройдя модели, сбрасывалась в водосборный бассейн, заканчивая этим свой рабочий круговорот.

Наполнение водой бассейна и периодические пополнения его в связи с потерями воды при работе на установках производились из водопровода. При чистке бассейна от загрязнения (в среднем три раза в год) вода сбрасывалась непосредственно в канализационную сеть.

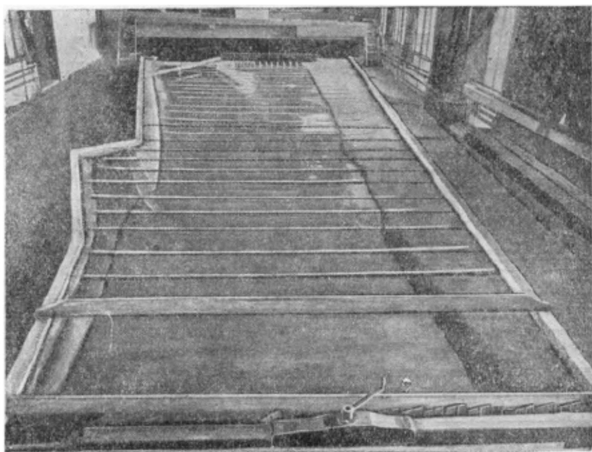
Вся система водоснабжения лаборатории была рассчитана на одновременную подачу на все установки воды в количестве около 400 *л/сек*.

Каждая из лабораторных установок была снабжена специальными головными устройствами для замера поступающего на модель расхода воды и для спокойной ее подачи на модель.

2. БОЛЬШАЯ ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ПЛОЩАДКА № 1

Общий вид пространственной площадки № 1 приведен на фиг. 7. Площадка предназначалась для исследования больших русловых моделей и в частности для исследования узлов сооружений канала (Волжский, Карамышевский узлы и т. д.).

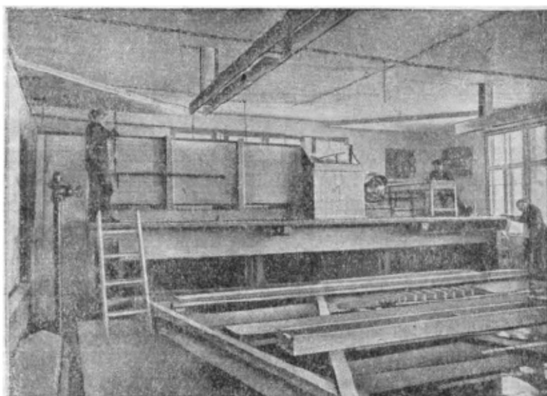
Площадка была устроена бетонной на щебеночной подготовке. Для установки поперечников и закрепления моделей сооружений в период их монтажа и испытания в продольном направлении площадки были втоплены деревянные



Фиг. 7. Общий вид пространственной площадки № 1

брусья с расстоянием между ними в 1,0 *м*. Это устройство вполне себя оправдало, выдержав более чем пятилетнюю непрерывную работу с частыми установками многих моделей и их разборкой.

Для подачи воды на площадку в пределах до 110 *л/сек* в голове ее был установлен успокоитель, общий вид и конструктивная схема которого приведены на фиг. 8 и 9.

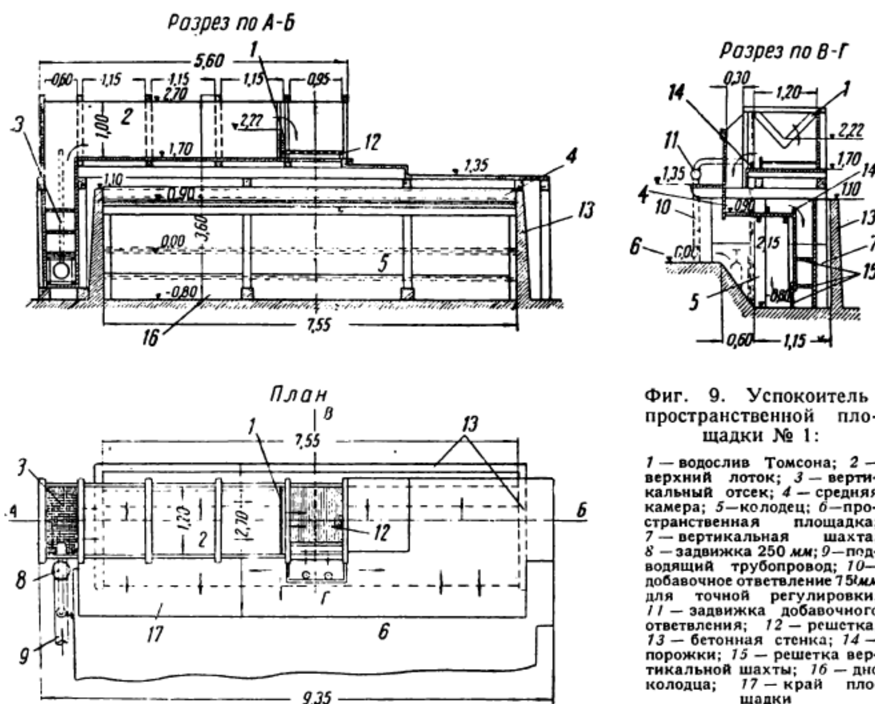


Фиг. 8. Общий вид успокоителя пространственной площадки № 1

Вода подавалась в вертикальный отсек *3* успокоителя (фиг. 9) напорным трубопроводом диаметром 250 *мм*. Регулирование подачи воды в пределах до 5 *л/сек* производилось имевшейся на трубе задвижкой Лудло *8* того же диаметра (у входа в успокоитель). Для достижения большей точности регулирования величины расхода имелась вторая, малая (75 *мм*), задвижка *11*, установленная на добавочном ответвлении *10*.

Вода, поступавшая снизу в вертикальный отсек — шахту *3*, проходила в нем систему решеток-успокоителей и направлялась в верхний горизонтальный лоток, подводивший ее к водосливу Томсона *1*. Напор воды на водосливе измерялся при помощи шпитценмасштаба, установленного в стеклянной водомерной трубке.

После водослива вода поступала в среднюю камеру успокоителя, где продольными порожками *14* распределялась по всей ширине успокоителя



Фиг. 9. Успокоитель пространственной площадки № 1:

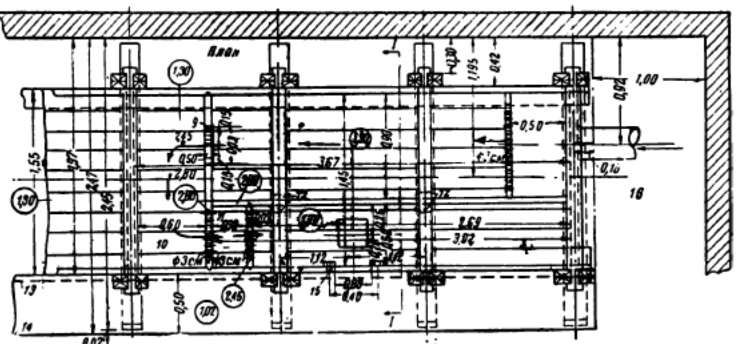
1 — водослив Томсона; *2* — верхний лоток; *3* — вертикальный отсек; *4* — средняя камера; *5* — колодец; *6* — пространственная площадка; *7* — вертикальная шахта; *8* — задвижка 250 *мм*; *9* — подводящий трубопровод; *10* — добавочное ответвление 75 *мм* для точной регулировки; *11* — задвижка добавочного ответвления; *12* — решетка; *13* — бетонная стенка; *14* — порожки; *15* — решетка вертикальной шахты; *16* — дно колодца; *17* — край площадки

(площадки). Переливаясь через последний из порожков, вода падала в вертикальную шахту *7* с двумя горизонтальными решетками *15* и через решетчатое отверстие у дна шахты по всей ширине поступала в колодец, откуда спокойным потоком изливалась на площадку.

3. МАЛЫЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ПЛОЩАДКИ № 2 и 3

Вторая часть зала пространственных площадок (14,0 × 8,5 *м*) (площадки № 2 и 3) была оборудована двумя одинаковыми, совершенно раздельными успокоителями, имевшими ввиду ограниченности места несколько иное устройство.

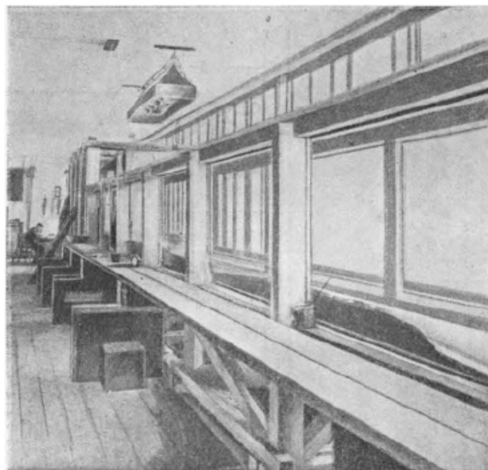
Вода по трубе диаметром 200 *мм* (также с добавочным регулировочным ответвлением) поступала в первый отсек успокоителя (фиг. 10). Переливаясь через мерный водослив Томсона и далее через поперечную камеру с несколькими решетками, вода попадала во второй отсек, параллельный первому, но с обратным направлением движения потока. Из этого отсека в зависимости от характера модели вода направлялась по двум путям: 1) по наклонной трубе *A* в нижнюю часть колодца *B*, откуда, распределившись по горизонтальной четырехугольной трубе *C* по ширине площадки, через решетки в боковой ее стенке изливалась на площадку и 2) по патрубку через шланг непосредственно на модель. Последнее устройство часто применялось при исследованиях донных водоспусков канала.



Фиг. 10. Успокоитель малых пространственных площадок № 2 и 3:

1 — 80 отверстий диаметром 25 *мм* с расстоянием между их центрами 5 *см*; *2* — съемная крышка; *3* — деревянная крышка; *4* — резиновая прокладка; *5* — скобы; *6* — бетонная подушка; *7* — бетонная изоляционная стенка; *8* — обшивка; *9* — водослив Томсона; *10* — успокоитель (сетка); *11* — запасный успокоитель; *12* — рейка 0,05×0,05×0,12; *13* — кромка водослива; *14* — кромка настила; *15* — резиновая прокладка; *16* — место для трубопроводов; *17* и *18* — задняя и нижняя стенки с отверстиями диаметром 3 *см* (по 2 ряда) и с расстоянием по горизонталям между их центрами 10 *см*

При этой схеме успокоителя вода, поступавшая на модель, оказывалась сильно аэрированной, вследствие чего не создавалось полного успокоения при изливе ее на модель; потребовалась дополнительная установка на нижней горизонтальной трубе вертикальных трубок для выпуска выделяющегося из воды воздуха.



Фиг. 11. Общий вид плоского лотка

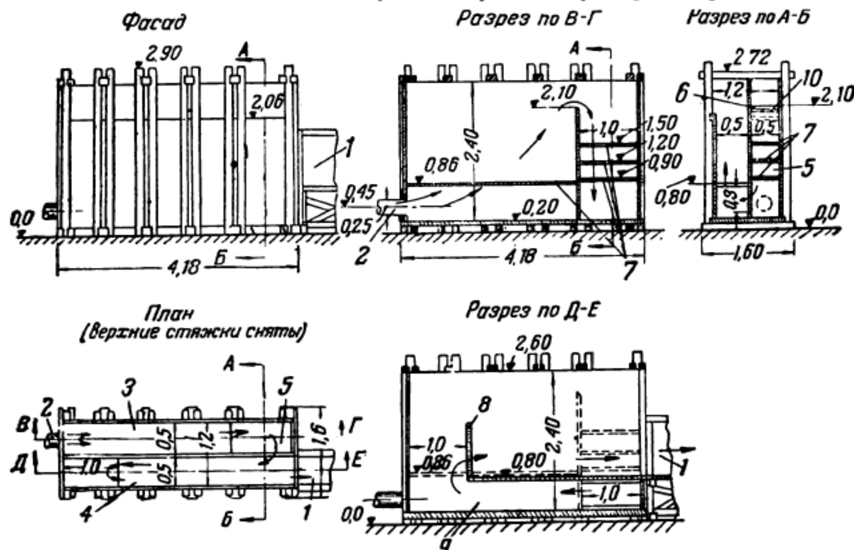
Максимальный расход на каждом успокоителе достигал 60 *л/сек*.

4. ПЛОСКИЙ ЛОТОК

Плоский лоток (фиг. 11) имел ширину между вертикальными стеклами 50 *см* и рабочую длину 9 *м*. Конструкция лотка — деревянная, с бетонным дном.

Головной успокоитель лотка (фиг. 12), весьма компактный и сравнительно небольших размеров, обеспечивал даже при пропуске максимального расхода в 120 *л/сек* совершенно спокойный подход воды к мерному водосливу Базена и спокойное поступление воды в лоток.

Успокоитель (фиг. 12) разделен продольной стенкой на два параллельных отсека. Вода по трубе диаметром 250 *мм* поступала в нижнюю часть первого отсека (левого по направлению течения в лотке). Пройдя мерный водослив Базена, вода падала в вертикальную шахту с рядом решеток и далее



Фиг. 12. Успокоитель плоского лотка:

1 — лоток; *2* — подводящий трубопровод; *3* — левый отсек; *4* — правый отсек; *5* — вертикальная шахта; *6* — водослив Базена; *7* — решетки; *8* — сотовая решетка; *9* — нижняя траншея; *10* — продольная стенка

через отверстие в продольной вертикальной перегородке поступала в нижнюю траншею правого отсека. Двигаясь по траншее к задней стенке успокоителя,

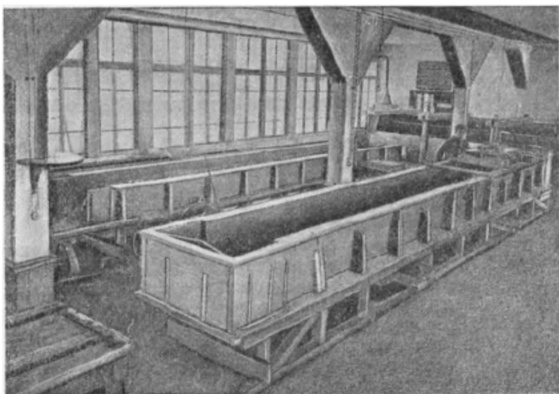
вода далее поднималась вверх через особое отверстие и, пройдя сотовую решетку, изливалась в лоток.

В конце лотка было устроено сливное приспособление в виде цилиндра из листового железа с патрубком в дне, которое при тарировке водослива успокоителя позволяло переводить поток, вытекающий из лотка, в особый мерный бак емкостью 9 *м³*, расположенный под полом зала, а при нормальной работе направлять его в общий водосборный бассейн. Это переключение осуществлялось поворотом цилиндра вокруг его вертикальной оси.

5. ШЛЮЗНАЯ УСТАНОВКА

Шлюзная установка (фиг. 13) была осуществлена в виде двух лотков, соответствующих по габаритам исследуемым камерам шлюзов канала (в масштабе 1 : 40), и головных устройств для поддержания постоянных горизонтов верхнего и нижнего бьефов шлюза.

Один лоток предназначался для исследований отстоя судов и гашения энергии при выпуске воды через нижнюю голову шлюза и состоял из модели шлюзной камеры длиной 7,5 *м* и шириной по дну 76 *см*, площадки для размещения сменных моделей голов шлюза и подводящего канала нижнего бьефа длиной около 7,0 *м*. Второй лоток предназначался для исследования затворов на верхней и средней головах шлюза. Этот лоток состоял из двух камер по 7,5 *м* длиной и двух площадок для размещения моделей голов шлюза.



Фиг. 13. Общий вид шлюзной установки

Конструкция головного устройства шлюзных установок была осуществлена с таким расчетом, чтобы при изменении в период шлюзования расхода от нуля до максимального значения горизонты верхнего и нижнего бьефов поддерживались постоянными. С этой целью в головном устройстве шлюзных моделей был расположен водослив достаточно большой длины по гребню. При изменении расхода от нуля до 50 *л/сек* колебания горизонтов не превышали 2 *мм*.

В качестве мерного устройства был установлен водослив Базена с максимальной пропускной способностью в 40 *л/сек*.

6. ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ УСТАНОВКИ

Оборудование, которым располагала лаборатория к началу работ по исследованию фильтрации (январь 1934 г.), сводилось к двум установкам, заимствованным из других лабораторий: 1) прибор ЭГДА конструкции инж. Осокина для решения плоских задач на станиолевой пластинке и 2) фильтрационный плоский лоток небольших размеров, оборудованный приспособлениями, позволяющими замерять горизонты грунтовых вод лишь примитивными методами. С течением времени эти установки были значительно усовершенствованы: был переконструирован и упрощен прибор ЭГДА, освоены различные приемы производства опытов при изучении напорного и безнапорного грунтового водного потока, и в результате созданы совершенно новая аппаратура и новые методы и способы производства опытов (гл. VI).

7. ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА

Помимо измерительной аппаратуры (шпитценмасштабы, трубки Пито-Дарси, Пито-Ребока и др.), обычно применяемой в гидротехнических лабораториях, в процессе исследований возникла необходимость в применении и более сложной специальной аппаратуры (хронографы, волномеры, динамограф и пр.). Эта аппаратура создавалась в гидротехнической лаборатории Строительства и, начиная от простейших и кончая самыми сложными приборами, была изготовлена в собственных мастерских.

К концу своей работы гидротехническая лаборатория располагала следующей измерительной аппаратурой:

1. Для измерения горизонтов воды:
   1) шпитценмасштабы различных конструкций;
   2) электрифицированные шпитценмасштабы;
   3) лимниграфы с переменной скоростью вращения барабана.
2. Для измерения скоростей течения (глубинных):
   1) трубки Пито-Дарси;
   2) » Пито;
   3) » Пито-Ребока;
   4) » Лосиевского;
   5) микровертушка опытного образца.
3. Для измерения поверхностных скоростей и фиксации линий токов:
   1) приспособления для фотофиксации с прерывной съемкой и применением маятника Кнеллера;
   2) приспособления для непрерывной фотофиксации с применением поверхностной и глубинной окраски.
4. Для измерения давлений в потоке и на поверхностях сооружений:
   1) пьезометры;
   2) микропьезометры.
5. Для измерения усилий:
   Динамометры с записью максимальных и минимальных усилий.
6. Для измерения давлений, переменных во времени:
   1) виброграф для записи вибраций сегментных затворов;
   2) прибор Маккавеева для исследования отстоя судов в камере шлюза;
   3) динамограф.
7. Прочая аппаратура:
   1) осциллограф (трехшлейфный);
   2) телетензометры;
   3) электрощупы;
   4) хронографы;
   5) плоский и пространственный жидкостные приборы ЭГДА;
   6) прибор Замарина для исследований фильтрации под гидротехническими сооружениями;
   7) пантограф;
   8) реохорды и другая электроизмерительная аппаратура;
   9) волномер (фото и электрический).

Всего за время строительства в мастерских гидротехнической лаборатории было изготовлено до 1 500 различных приборов.

8. СТРУКТУРА ЛАБОРАТОРИИ

В сентябре 1933 г. гидротехническая лаборатория была переименована в производственно-исследовательскую лабораторию, состоявшую из следующих отделений: гидротехнического, грунтового, химического, точных приборов и несколько позднее бетонного.

В этом виде лаборатория просуществовала до 1934 — 1935 гг., когда зародившиеся ячейки по грунтовым, химическим и бетонным исследованиям выделились в самостоятельные единицы, образовав геотехнический отдел и центральную бетонную лабораторию.

В январе 1935 г. в составе гидротехнической лаборатории была организована группа по исследованию сооружений в натуре, явившаяся ядром выделенного из лаборатории в мае того же года самостоятельного бюро, а впоследствии отдела наблюдений и исследований гидротехнических сооружений. С того же

времени из состава гидротехнического отделения выделилась группа фильтрации, бывшая до того одной из бригад отделения.

В июне 1935 г. была произведена коренная реорганизация лаборатории. Из состава ее было выделено грунтовое отделение, превратившееся в самостоятельный геотехнический отдел, а химическое отделение было переведено в центральную бетонную лабораторию. Гидротехническое отделение (переименованное в отделение гидравлики сооружений), фильтрационная группа и отделение точных приборов были преобразованы в гидротехническую лабораторию, и в этом виде лаборатория осталась до конца строительства.

В своем конечном виде гидротехническая лаборатория состояла из следующих основных звеньев-отделений:

а) отделения гидравлики сооружений;

б) группы и впоследствии отделения фильтрации;

в) отделения точных приборов;

г) модельной мастерской.

Таковы те последовательные изменения в структуре гидротехнической лаборатории, которые диктовались необходимостью наилучшего и целесообразного разрешения насущных нужд и требований строительства. Опыт последующей работы до конца строительства со всей очевидностью показал правильность принятого в 1935 г. решения, подтвердив и закрепив то положение, что исследовательские ячейки, группы и отделы в условиях строительства должны быть гибкими и оперативными, так как только при этом условии возможно наилучшее разрешение всех предъявляемых им строительством вопросов.

9. РАБОЧИЙ СОСТАВ ЛАБОРАТОРИИ

Организационно-экспериментальная работа на моделях в отделениях гидравлики сооружений и фильтрации строилась по принципу бригад, во главе которых стоял руководитель исследований по теме в лице старшего инженера.

Этот принцип проработки отдельных тем отделений бригадами на практике вполне себя оправдал, при этом лучшего успеха удавалось достигнуть при постоянном закреплении работников за бригадами. Весь состав работников отделения гидравлики сооружений был разбит на четыре бригады: 1) большой пространственной площадки, 2) малых пространственных площадок, 3) плоского лотка и 4) шлюзов. Аналогичная разбивка была произведена и в отделении фильтрации.

Несколько особое положение занимало отделение точных приборов. Дело в том, что лабораторная работа по исследованию гидротехнических сооружений, а также производившиеся первоначально в лаборатории исследования грунтов и химические исследования требовали значительного количества точных измерительных приборов, которые в готовом виде можно было приобрести только в редких случаях. Заказ их в специальных мастерских на стороне потребовал бы длительного срока, больших средств и постоянного отрыва сотрудников для наблюдения за их изготовлением, что повлекло бы за собой частые и длительные командировки. Наконец приобретение импортного оборудования привело бы к очень большим затратам и было вообще нежелательно.

Поэтому для изготовления этих приборов было создано отделение точных приборов, которое широко развернуло свою работу, являясь неотъемлемой частью лаборатории. Мастерская точных приборов изготовляла все требовавшиеся для работы лаборатории приборы, что дало возможность работникам лаборатории в тесном контакте с конструкторами и квалифицированными мастерами самим создавать сложную, нередко впервые осваиваемую аппаратуру, а также изготовлять ряд сложных моделей сооружений, требовавших точных частей и механизмов; при этом в процессе испытаний модели изменялись и переделывались на ходу без сколько-нибудь заметных перебоев или остановок исследовательских работ [1].

[1] Мастерская была оборудована различными станками: токарными, сверлильными, строгальными, шлифовальными и часовым для точных работ. Общее количество станков к концу строительства достигло 12.

10. ОРГАНИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ РАБОТЫ

Каждая поступавшая на исследование в гидротехническую лабораторию Строительства тема проходила следующий путь.

По заданию, получаемому главным образом от Проектного отдела, с перечнем основных вопросов, подлежащих исследованию, и необходимыми гидрологическими и проектными материалами соответствующей бригадой лаборатории разрабатывалась подробная рабочая программа. Программа детально обсуждалась и согласовывалась с отделом Строительства, выдавшим задание.

По разработанным бригадой чертежам и эскизам модельная мастерская и отделение точных приборов изготовляли модель, а также потребное к ней оборудование и измерительную аппаратуру. Опыты велись в тесном контакте с отделом-заказчиком, который все время извещался о ходе исследований; последнее условие особенно важно и ценно для наибольшей продуктивности и быстроты использования опытных данных при проектировании.

По окончании исследований составлялся подробный технический отчет и давалось заключение по исследованному варианту, а в случае неудовлетворительности предложенного заказчиком варианта рекомендовалось более правильное и экономичное его решение.

11. ОСНОВНЫЕ РАБОТЫ, ВЫПОЛНЕННЫЕ ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЙ ЛАБОРАТОРИЕЙ

Как уже отмечалось, за время своей работы гидротехнической лабораторией Строительства канала было выполнено 180 отдельных исследований, главнейшие из которых приведены в табл. 1.

Таблица 1

№ п/п	Название проведенной исследовательской работы [1]	Результаты исследований
	1. Плоские и пространственные модели	
1	Исследование бетонной, одноярусной гравитационной плотины с пониженным порогом водослива (плотина № 9) в масштабе 1 : 60	1. Определена пропускная способность плотины 2. Проверены условия гашения кинетической энергии в нижнем бьефе и работа предохранительного плота. Выяснены порядок открытия затворов при пропуске паводков и картина размыва дна в нижнем бьефе 3. Изучены картина поверхностных течений в верхнем бьефе и распределение донных скоростей в пределах понура 4. Выяснены условия ледохода и в связи с этим установлено рациональное размещение отверстий плотины и количество и расположение сегментных затворов без ледопропускных клапанов
2	Исследование плотины № 10 (однотипной с плотиной № 9)	Разрешены те же задачи, как и на плотине № 9. В результате лабораторных исследований руководством Строительства сокращен один пролет плотины
3	Исследование водосброса при земляной плотине № 2 со слоистым песчано-торфяным экраном и понуром (повторное испытание головного сооружения ввиду внесения в проект изменений)	1. Проверены на модели форма и размеры водобоя и подобраны гасители энергии 2. Установлена пропускная способность водосброса при различном положении затвора 3. Проверена кривая спада в отводящем канале
4	Испытание шахтного водосброса № 3	1. Подобрана форма водосброса 2. Подобраны гасители энергии потока 3. Выяснены мероприятия для устранения засасывания в трубопровод воздуха со стороны верхнего бьефа

[1] Описание приводимых ниже сооружений см. в отдельных выпусках «Гидротехнические сооружения» и «Путевые сооружения».

№ п/п	Название проведенной исследовательской работы	Результаты исследований
		4. Выяснены условия растекания потока в отводящем канале при различных условиях эксплоатации
5	Испытание перепада	1. Подобрано очертание саморегулирующего щелевого водослива 2. Уточнены общие размеры сферической сливной поверхности и размеры отдельных зубьев 3. Установлены формы и размеры гасителей энергии
6	Испытание бассейна водопроводного канала	1. Исследована форма бассейна 2. Подобрана струенаправляющая стенка для уменьшения завихрения
7	Исследование подхода к одному из типовых однокамерных шлюзов со стороны нижнего бьефа	Подобраны формы очертания подходного участка судоходного канала со стороны нижнего бьефа при условии забора насосной станцией расхода воды $Q = 175$ *м³/сек* и сброса реки в канал через водосброс у шлюза
8	Исследование подхода к одному из типовых двухкамерных шлюзов со стороны верхнего бьефа	1. Подобраны очертания подходного участка канала со стороны верхнего бьефа в месте ответвления деривационного канала к ГЭС 2. Подобраны эстакады с углубленной заборной стенкой
9	Испытания сифонных водосбросов у двух регуляторов водопроводного канала	1. Выбраны рациональная форма и размеры сифонных водосбросов требуемой пропускной способности 2. Выяснена целесообразная форма переходного участка от сифона до отводящего канала и подобраны гасители энергии 3. Выяснено влияние нижнего бьефа на высоту и скорость зарядки сифонов 4. Установлена минимальная величина давления в ключевом сечении во время полной работы сифона 5. Определена минимальная высота зарядки
10	Испытание заградительных ворот	1. Определена длина крепления в нижнем бьефе и подобраны гасители энергии, исходя из условий наполнения нижнего бьефа путем перелива через фермы Томаса 2. Определен коэфициент расхода при переливе
11	Испытания трех типовых заградительных ворот	1. Разработана система наполнения опорожненного бьефа через ворота 2. Подобраны гасители энергии 3. Установлен порядок маневрирования затворами во время наполнения опорожненного бьефа
12	Испытание двух откатных ворот	1. Подобраны гасители энергии 2. Разработан порядок открытия ворот при наполнении опорожненного бьефа 3. Уменьшено давление со стороны потока на ноги откатных ворот
13	Испытание водосброса у одной из ГЭС	1. Подобрано очертание водосброса и устройств для гашения кинетической энергии в нижнем бьефе 2. Выяснена возможность объединения сброса с гидроэлектростанцией 3. Произведен гидравлический расчет напорных трубопроводов ГЭС для выяснения их диаметров и количества во избежание кавитации

№ п/п	Название проведенной исследовательской работы	Результаты исследований
	2. Испытания шлюзов	
14	Испытание голов шлюзов (нижней головы двух типовых однокамерных шлюзов, средних голов двух типовых двухкамерных шлюзов и промежуточной головы на одном из однокамерных шлюзов)	Определены условия стоянки судов различной грузоподъемности и караванов их в нижнем подходном канале. Исследованы условия шлюзования судов вниз и вверх у средних и промежуточных голов шлюзов. Установлены скорость и высота подъема затворов и время наполнения и опорожнения камер
15	Исследование креплений и размывов в нижнем подходном канале для типового шлюза канала	Определены необходимая длина и тип крепления нижнего подходного канала
16	Испытания типового[1] шлюза для Северного канала	Подобраны конструкции гасителей энергии
17	Определение возможной высоты заградительных ворот у верхней головы одного из типовых шлюзов	Определена высота волны при мгновенном и постепенном закрытии аварийных ворот
18	Испытание условий наполнения шлюзной камеры путем перелива через спускные щитовые ворота верхней головы шлюза(тип Волга—Дон)	Произведены опыты по наполнению камеры через плоский опускной щит
19	Определение колебаний горизонта в верхнем бьефе одной из ГЭС	Определена высота волны при мгновенной остановке ГЭС
	3. Фильтрационные исследования	
20	Исследование фильтрации в основании одного из типовых шлюзов	Изучена картина фильтрационного потока в пространственном решении (по методу ЭГДА и в фильтрационном лотке) с целью выявления значений противодавления, выходных скоростей и фильтрационного расхода воды в ближайшую реку
21	Испытание подземного контура ГЭС при плотине № 11	Определены эпюры фильтрационного напора и значения взвешивающего противодавления при разных действующих напорах фильтрационного потока
22	Испытание левобережной дамбы при плотине № 11	Определена эффективная длина понура; устранен капиллярный сифон в теле плотины; определено расположение кривой депрессии и фильтрационного расхода
23	Испытание подземного контура плотины № 11	Определены эпюры фильтрационных напоров и значения противодавлений при учете артезианских вод в основании
24	Испытание подземного контура водосброса при плотине № 7 (двухстороннего напора)	Определены эпюры фильтрационных напоров, значение противодавлений, критические градиенты и количество шпунтов
25	Испытание подземного контура водосброса при плотине № 2	Определены эпюры фильтрационных напоров, значения противодавлений, расположение и количество шпунтов

[1] По специальному дополнительному заданию Правительства проектировалось судоходное соединение Химкинского водохранилища с р. Яузой. Осуществление этого проекта отнесено ко второй очереди.

№ п/п	Название проведенной исследовательской работы	Результаты исследований
26	Испытание приканальных дамб	Определены расположение кривой депрессии и величины фильтрационных расходов
27	Испытание одного из типовых однокамерных шлюзов	Определены эпюры фильтрационных напоров и значения противодавления с учетом артезианских вод в основании
28	Испытание одного из типовых двухкамерных шлюзов	Определена сетка движения фильтрационного потока в основании сооружения
29	Испытание плотины № 3 (укатанная песчаная плотина с глиняным экраном и понуром)	Определены влияние размеров и расположение щелей в экране плотины на положение кривой депрессии
30	Определение размеров глинизации в основании плотины № 5 (суглинистая с центральным ядром)	Теоретически разработан вопрос о размерах глинизированной шпоры в основании плотины с целью уменьшения фильтрационных расходов
31	Испытание на фильтрацию типовых профилей земляных плотин на проницаемом и непроницаемом основаниях	Проведенная научно-исследовательская работа не закончена
32	Исследование дамбы водохранилища у плотины № 2 по методу ЭГДА и теоретически	Определены положение кривой депрессии и фильтрационный расход с целью выявления возможности отказа от экрана; достигнуто это разработкой соответствующей конструкции дренажа
33	Изучение работы дренажа водопроводного канала	Определены расположение кривой депрессии и величины фильтрационных расходов

Кроме того были проведены теоретические и экспериментальные исследования по следующим вопросам:

34	Определение сил, действующих на сегментные ворота верхних голов шлюзов (при наличии направляющего козырька)	Определены присасывающие и выталкивающие затвор дополнительные силы, действующие на затвор при его подъеме, применительно к типовому шлюзу на канале
35	Исследование устойчивости бетонных плит	1. Разработана новая теория устойчивости плит, подтвержденная опытами 2. Предложена расчетная формула для устойчивости бетонных плит
36	Исследование устойчивости рисбермы бетонной плотины № 11	Исследована устойчивость бетонных шашек для рисбермы
37	Исследование условий постройки банкета земляной плотины № 6 наброской камня в текущую воду	Определены порядок возведения банкета наброской камня в текущую воду и крупность требуемого камня, исходя из условия минимального объема работ

Продолжение табл. 1

№ п/п	Название проведенной исследовательской работы	Результаты исследований
38	Исследование очертаний водопроводных галлерей в нижних и средних головах шлюзов	1. Подобраны внутренние очертания водопроводных галлерей и раздельных стенок, исходя из условий движения потока на закруглениях без отжима 2. Выяснено распределение давления за затвором (в вертикальной плоскости) при различных его открытиях 3. В результате опытов запроектированы окончательная форма и размеры галлерей
39	Исследование колебаний сегментных затворов	Разработана методика исследования. Сделан и освоен прибор (виброграф-резонатор). Проведен ряд опытов и теоретическое исследование

ГЛАВА III

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОДОСЛИВНЫХ ПЛОТИН И ВОДОСБРОСОВ КАНАЛА

Все основные бетонные водосливные и водосбросные сооружения канала были подвергнуты лабораторным исследованиям как в лотке (плоская задача), так и на пространственных моделях. При этом как плоская задача исследовалась работа отдельных элементов сооружений и их очертание с целью отыскания наиболее экономичной и рациональной конструкции (например разбиралось очертание водопропускных устройств, определялись коэфициенты расхода, исследовались условия гашения энергии в нижнем бьефе и т. д.). На пространственных моделях производилось корректирование результатов исследования плоского течения при моделировании сооружений в лотке и изучались поведение и работа всего узла сооружений или отдельного сооружения в целом, общая пропускная способность его, плановое очертание подводящих и отводящих каналов и т. д.

Принятый порядок исследований позволил весьма подробно и с достаточной тщательностью изучить работу сооружения, установить взаимное влияние отдельных его элементов и дать апробированное опытами решение плановой компоновки всего узла сооружений в целом и отдельных его элементов с установлением рациональной схемы эксплоатации.

Из основных деталей водосбросных сооружений опытами на моделях были изучены:

1) очертание (форма) и пьезометрические давления на водосливных поверхностях;

2) пропускная способность и коэфициенты расхода;

3) гашение энергии в нижнем бьефе сооружений (подбор системы гасителей) и

4) тип и размеры креплений русла за сооружением.

1. ВОДОСЛИВ ПОЛНОГО ПРОФИЛЯ

В последующем изложении исследования полного водосливного профиля описаны лишь для двух наиболее характерных в этом отношении сооружений канала:

1) бетонной гравитационной плотины № 11 смешанного типа с напором в 17,8 *м*;

2) водосброса при укатанной песчаной плотине № 3 напором 17,0 *м* с глиняным экраном и понуром.

Основными вопросами, которые надлежало изучить, являлись отыскание безвакуумного очертания и определение пропускной способности и коэфициента расхода профиля.

При всех исследованиях лаборатория устанавливала очертания водосливной поверхности по траектории свободного падения частицы воды. Это построение сводилось обычно к нахождению координат свободного падения частиц нижней струйки водосливной струи, т. е. к отысканию значения коэфициента A в уравнении типа:

$$y = Ax^2. \quad (1)$$

Величина этого коэфициента определяется начальной горизонтальной скоростью струйки:

$$A = \frac{g}{2v_0^2}. \quad (2)$$

За величину v_0 обычно принимали скорость нижней струйки в сечении над гребнем водослива, равную

$$v_0 = \varphi \sqrt{2gH}, \quad (3)$$

где H — напор над гребнем водослива без учета подходной скорости;

ψ — коэфициент скорости (принималось $\psi = 0{,}95$);

g — ускорение силы тяжести.

В отдельных случаях (донный водосброс при земляной плотине № 2) v_0 определялось непосредственными измерениями на модели.

Эта скорость соответствует случаю начального открытия затвора. В отдельных случаях влияние некоторых дополнительных факторов, о которых будет сказано ниже, вынуждало лабораторию итти на изменение величины A в сторону ее уменьшения.

В соответствии с этим очертание водосливного профиля бетонной плотины № 11 определилось уравнением: $y = 0{,}0672\,x^2$ и для водосброса при плотине № 2: $y = 0{,}04\,x^2$.

Принятый метод построения очертания водосливного профиля несколько отличался от обычных способов, например от способа построения его по координатам, полученным Кригером, или по координатам, рекомендуемым иными исследователями. Преимущество этого метода заключалось в том,что он позволял чрезвычайно быстро отыскивать очертание не только для водослива полного профиля со свободным переливом, но и для случая, когда на гребне водосливной поверхности располагались затворы (которые могли быть частично открыты), а также для отверстий донных сбросов (например донный водоспуск при плотине № 2).

Приводим результаты опытов:

а) Д о н н ы й в о д о с б р о с п р и з е м л я н о й п л о т и н е № 2. Первоначальный проектный профиль водосливной стенки (фиг. 14 — пунктир) был исследован [1] на вакуумность при двух расходах: $Q = 27{,}5$ *м³/сек* — через два трубопровода и $Q = 14{,}0$ *м³/сек* — через один трубопровод. Соответственно этим расходам горизонты в нижнем бьефе устанавливались на отм. 102,85 и 102,32 *м*, при которых сопряжение струи в нижнем бьефе происходило в форме затопленного прыжка.

Кроме того в опытах был воспроизведен случай пропуска расхода $Q = 27{,}5$ *м³/сек* при отогнанном прыжке, предельное положение которого устанавливалось при горизонте нижнего бьефа (для проектного варианта колодца) на отм. 102,45 *м*. Величины давлений на профиле в метрах водяного столба (пе-

---

[1] Пространственная модель в масштабе 1 : 20.

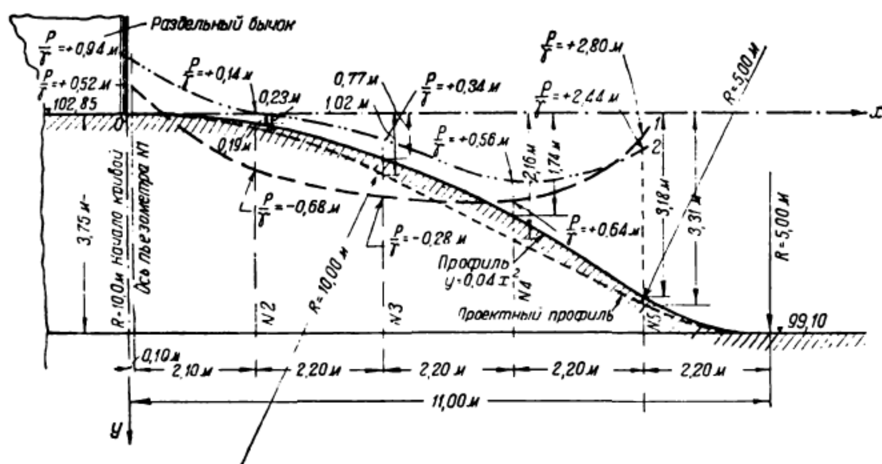
ресчитанные с моделей на натуру по линейному закону), полученные в опытах для указанных случаев, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Схемы эксплоатации	№ пьезометров				
	1	2	3	4	5
Давления в метрах натуры при $Q = 27,5$ м³/сек; Г.Н.Б. = 102,85 м	0,52	−0,68	−0,28	0,64	2,80
То же при $Q = 27,5$ м³/сек; Г.Н.Б. = 102,48 м	0,52	−0,70	−0,28	0,50	1,72
То же при $Q = 14,0$ м³/сек; Г.Н.Б. = 102,32 м	0,52	−0,72	−0,36	0,48	2,60

Кривая распределения давлений на профиле при $Q = 27,5$ м³/сек представлена графически на фиг. 14.

Таким образом результатами наблюдений была установлена вакуумность запроектированного профиля в средней и верхней его частях (пьезометры № 2



Фиг. 14. Распределение давлений на поверхности сливной стенки донного водосброса земляной плотины № 2 при $Q = 27,5$ м³/сек и Г. Н. Б. = 102,85 м:

1 — кривая давлений для проектного профиля; *2* — кривая давлений для профиля $y = 0.04\ x^2$

Координаты поверхности сливной стенки и распределение давлений под струей

№ пьезометров	Координаты поверхности водослива в м			$\frac{p}{\gamma}$ в м	
	x	y: проектный профиль	y: по уравнению $y = 0,04 \cdot x^2$	проектный профиль	профиль по уравнению $y = 0,04\ x^2$
1	0,10	0,00	0,00	+0,52	+0,94
2	2,20	0,23	0,19	−0,68	+0,14
3	4,40	1,02	0,77	−0,28	+0,34
4	6,60	2,16	1,74	+0,64	+0,56
5	8,80	3,31	3,18	+2,80	+2,44

Примечание. Кривая сливной стенки на участке от начала ее до пьезометра № 4 очерчена по уравнению $y = 0,04\ x^2$; на участке же ниже пьезометра № 4 дано произвольное плавное сопряжение.

и 3, см. фиг. 14 и табл. 2). Наибольшее значение вакуума, зарегистрированное пьезометром № 2 при пропуске $Q = 14{,}0$ *м³/сек*, измерялось величиной 0,72 *м* [1].

Как положительные, так и отрицательные давления под струей во всех приведенных случаях пропуска расходов у одних и тех же пьезометров оказались весьма близкими друг к другу. Исключением в этом отношении являлся только участок кривой у места расположения пьезометра № 5, где условия протекания струи, как показали наблюдения, зависели от высоты горизонта воды в нижнем бьефе.

На участке водосливной стенки, лежавшей выше пьезометра № 4, колебание горизонта нижнего бьефа в пределах от 102,85 и ниже не сказывалось на давлении под струей; имевшаяся здесь некоторая расходимость в показаниях одноименных пьезометров находилась уже в пределах точности опытов; она могла также произойти вследствие неравномерности растекания струи по водосливной поверхности стенки. В основу построения нового безвакуумного профиля было положено уравнение $y = Ax^2$.

Замеренная в опыте максимальная скорость схода струи с горизонтального порога на криволинейный участок водосливной стенки при $Q = 27{,}5$ *м³/сек* оказалась равной $v_0 = 11{,}2$ *м/сек*. При этой скорости уравнение траектории струи получилось равным $y = 0{,}04\ x^2$.

При наложении на первоначальный (проектный) профиль кривой, построенной по уравнению $y = 0{,}04\,x^2$, последняя оказалась в средней своей части значительно смещенной вверх от запроектированной водосливной поверхности (фиг. 14).

Новый профиль водосливной поверхности (фиг. 14 — сплошная кривая и фиг. 15) был исследован в двух случаях:

1) в первом случае между началом криволинейного участка водослива и выходным сечением трубопроводов был устроен горизонтальный участок длиной 3,85 *м* (фиг. 14);

2) во втором случае длина горизонтального порога была сокращена на 3,5 *м*, т. е. горизонтальный участок был оставлен длиной всего в 0,35 *м* (фиг. 15).

В табл. 3 приведены для обоих случаев пьезометрические давления в метрах водяного столба на водосливной поверхности с пересчетом данных на натуру для профиля, построенного по уравнению $y = 0{,}04\ x^2$.

Таблица 3

№ пьезометров		1	2	3	4	5
Давления в метрах натуры при:						
$Q = 27{,}5$ *м³/сек*	1-е очертание (фиг. 14)	0,94	0,14	0,34	0,56	2,44
Г.Н.Б. = 102,85 *м*	2-е очертание (фиг. 15)	0,98	0,26	0,20	0,50	3,90
То же при:						
$Q = 27{,}5$ *м³/сек*	1-е очертание (фиг. 14)	0,92	0,12	0,32	0,56	1,30
Г.Н.Б. = 102,40 *м*	2-е очертание (фиг. 15)	—	—	—	—	—
То же при:						
$Q = 14{,}0$ *м³/сек*	1-е очертание (фиг. 14)	0,90	0,16	0,34	0,52	2,21
Г.Н.Б. = 102,32 *м*	2-е очертание (фиг. 15)	0,98	0,26	0,20	0,50	4,00

На фиг. 14 и 15 эти данные приведены графически для случая $Q = 27{,}5$ *м³/сек* и Г. Н. Б. = 102,85 *м*.

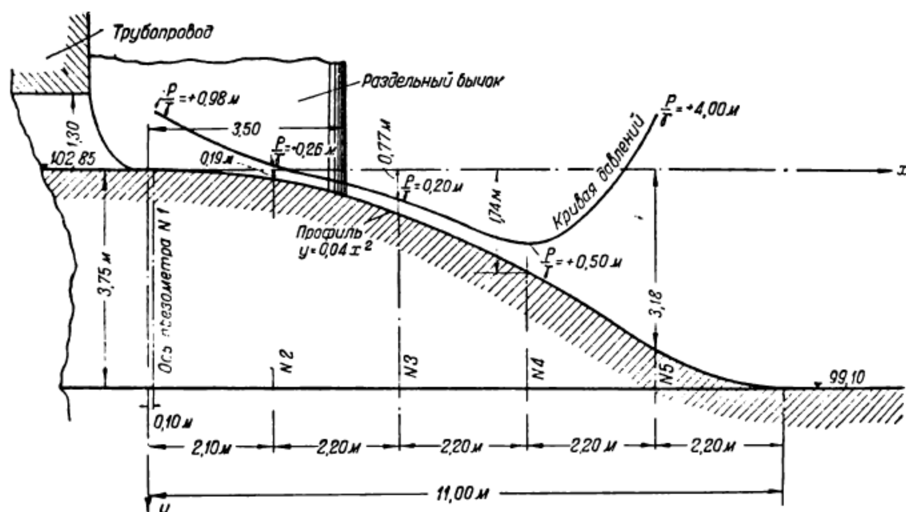
Опыты показали, что давление струи на водосливную поверхность, очерченную по уравнению $y = 0{,}04\ x^2$, в обоих случаях (горизонтальная вставка длиной 3,85 и 0,35 *м*) положительное.

Сокращение горизонтального порога несколько понижает давления на среднем участке кривой (пьезометры № 3 и 4). Полученное очертание при горизонтальной вставке длиной 0,35 *м* и было принято при разработке окончательного проекта сооружения.

[1] Величина этого вакуума, как и всех отрицательных давлений, встречающихся в настоящем отчете, является линейным пересчетом модельного показания пьезометра на натуру. Поэтому величины вакуума, приводимые в отчете, являются приближенными.

б) Бетонная плотина № 11. Первоначальное проектное очертание водосливной поверхности плотины, полученное по координатам Кригера, приведено на фиг. 16.

Характер распределения давлений на водосливной поверхности, наблюденный на модели при различных удельных расходах q, приведен на той же фигуре.



Фиг. 15. Распределение давлений на поверхности сливной стенки донного водосброса плотины № 2 после сокращения горизонтального порога на 3,5 м при $Q = 27,5$ м³/сек и Г. Н. Б. = 102,85 м

Координаты поверхности сливной стенки и распределение давлений под струей

№ пьезометра	Координаты в м		$\frac{p}{\gamma}$ в м
	x	y	
1	0,10	0,00	0,98
2	2,20	0,19	0,26
3	4,40	0,77	0,20
4	6,60	1,74	0,50
5	8,80	3,18	4,00

Примечание. Кривая сливной стенки на участке от начала ее до пьезометра № 4 очерчена по уравнению $y = 0,04\,x^2$; на участке ниже пьезометра № 4 дано произвольное плавное сопряжение.

Величины замеренных давлений в метрах водяного столба (пересчитанных на натуру по линейному закону) приведены в табл. 4.

Таблица 4

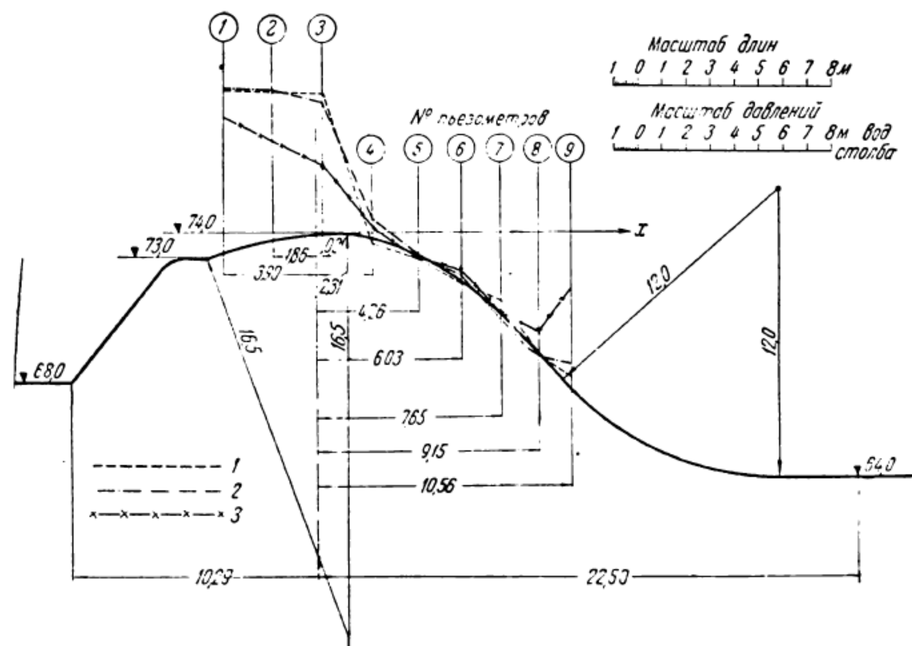
Схема эксплоатации	№ пьезометров								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1. $q = 3,02$ м³/сек; Г.Н.Б.=62,6 м (истечение из-под щита)	6,69	6,12	5,91	—0,21	—0,12	—0,12	0,51	0,30	0,4
2. $q = 7,27$ м³/сек; Г.Н.Б.=65,2 м (истечение из-под щита)	6,75	6,15	5,55	0,72	—0,06	—0,24	—0,24	—0,06	1,0
3. $q = 31,30$ м³/сек; Г.Н.Б.=69,70 м (свободный перелив)	5,64	4,14	2,94	0,60	—0,09	0,45	0,15	1,05	3,93

Приведенные данные показывают, что максимальный вакуум составляет —0,24 м. В третьем случае эксплоатации, применительно к которому и построена водосливная поверхность, вакуум не превышает —0,09 м.

Так как замеренные величины вакуумов не выходят за пределы точности

испытаний, то запроектированный профиль водослива можно признать удовлетворительным. Однако для большей уверенности в безопасности сооружения его очертание было несколько изменено и профиль был построен несколько более полным по уравнению $y = 0{,}0672\ x^2$. Новое очертание приведено на фиг. 17.

Конечная точка водосливной кривой ($y = 5{,}45$ *м*, $x = 9{,}0$ *м*), построенной по уравнению $y = 0{,}0672\ x^2$, оказалась всего на 0,5 *м* выше соответствующей точки, построенной по Кригеру.



Фиг. 16. Распределение давлений на водосливной поверхности плотины № 11 при очертании ее по координатам Кригера:

1 — $q = 3{,}02$ *м³/сек*, $h = 1{,}25$ *м*; *2* — $q = 7{,}27$ *м³/сек*, $h = 2{,}70$ *м*; *3* — $q = 31{,}30$ *м³/сек*, $h = 7{,}20$ *м*; q — удельный расход; h — глубина нижнего бьефа

Измеренные давления (пересчитанные на натуру по линейному закону) показали в этом случае следующее (табл. 5).

Таблица 5

Схема эксплоатации	№ пьезометров								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1. Щит на гребне водослива открыт на 0,5 *м*	5,34	−0,15	0,00	0,00	0,27	0,18	0,86	1,30	1,15
2. Щит открыт на 1,0 *м*	4,65	−0,25	−0,08	−0,08	0,21	0,375	1,81	2,25	1,06
3. » » полностью	2,37	0,34	0,00	0,065	0,93	3,09	7,30	9,05	1,10

Расположение пьезометров и кривые распределения давлений приведены на фиг. 17.

Сопоставляя распределение давлений (фиг. 16 и 17) при очертании водосливной поверхности по Кригеру и по уравнению $y = 0{,}0672\ x^2$, можно отметить, что во втором случае (параболическое очертание) при свободном переливе вакуумы на водосливной поверхности отсутствуют [1].

[1] Произвести более детальное сопоставление не представилось возможным ввиду значительного различия в конструкциях щитов, устанавливавшихся на гребне водослива (в первом случае — щиты с ледопропускными клапанами) и следовательно ввиду различия схем эксплоатации.

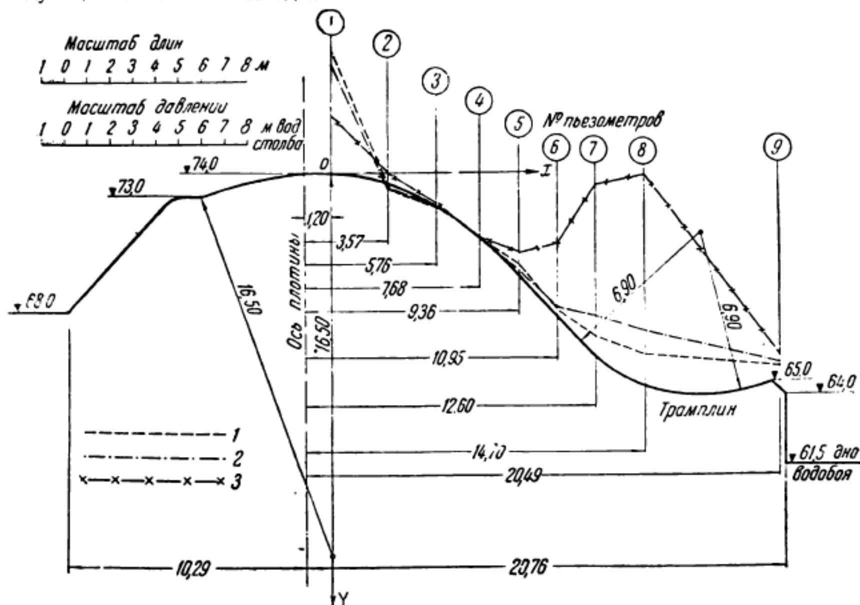
При разработке рабочего проекта сооружения было принято полученное лабораторией очертание по уравнению:

$$y = 0{,}0672\ x^2.$$

в) Водосброс при плотине № 3. Для водосброса при плотине № 3 испытаниям [1] в лаборатории было подвергнуто проектное очертание водослива полного профиля, полученное по координатам Кригера.

Результаты испытаний (фиг. 18 и 19) показали, что запроектированный профиль является удовлетворительным.

Проведенные исследования водосливов полного профиля позволили сделать следующие основные выводы:



Фиг. 17. Распределение давлений на водосливной поверхности плотины № 11 при очертании ее по уравнению $y = 0{,}0672\,x^2$:

1 — $q = 3{,}73$ $м^3/сек$, $h = 1{,}64$ $м$; *2* — $q = 7{,}27$ $м^3/сек$, $h = 4{,}40$ $м$; *3* — $q = 31{,}30$ $м^3/сек$, $h = 8{,}00$ $м$

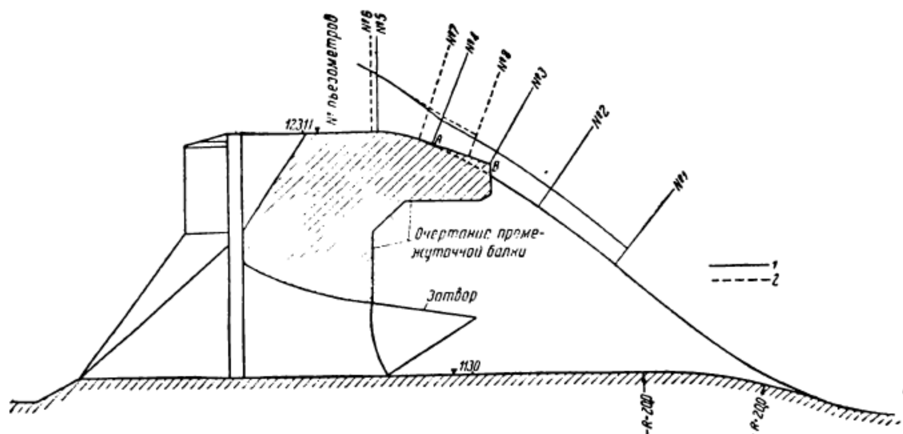
1. Найденное по методу, изложенному выше ($y = Ax^2$), очертание водослива обеспечивает безвакуумность профиля, гарантируя на всем его протяжении положительные пьезометрические давления.

2. Большим преимуществом принятого метода построения водосливной поверхности является возможность определения координат точек сливной поверхности для любых условий излива — как для свободного перелива, так и при истечении из-под щита, устанавливаемого на гребне и в донных отверстиях водопропускных пролетов сооружения. Кроме того этим же методом может быть подобрана форма водосливной поверхности для любых условий работы донных водоспусков или сбросов.

3. С экономической стороны очертание водослива, полученное по уравнению $y = Ax^2$, дает достаточно обжатый профиль, что характеризуется относительно небольшими положительными пьезометрическими давлениями на водосливной поверхности при полном отсутствии вакуумов на поверхности при свободном изливе воды через гребень водослива.

4. По сравнению с наиболее распространенным очертанием водосливной поверхности по координатам Кригера принятое на строительстве очертание по

[1] Пространственная модель в масштабе 1 : 40.

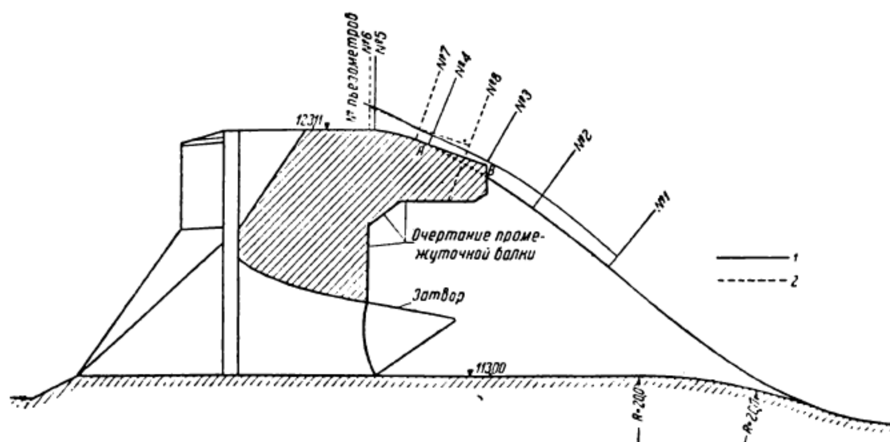


Фиг. 18. Распределение давлений на водосливной поверхности водосброса земляной плотины № 3. Первый случай эксплоатации: водосливные отверстия открыты полностью, донные — закрыты. Г. В. Б. = 127,60 *м*, Г. Н. Б. = 115,10 *м*, $Q = 382{,}5$ *м*³/*сек*:

1 — пьезометрические давления на сплошной водосливной кривой; *2* — то же на водосливной кривой, расположенной над донными отверстиями

Величины пьезометрических давлений для натуры (пересчитанные с модели по линейному закону)

№ пьезометров	1	2	3	4	5	6	7	8
Пьезометрические высоты в *м* вод. ст.	+0,88	+0,93	+1,00	+1,08	+2,30	+2,31	+1,36	+1,02



Фиг. 19. Распределение давлений на водосливной поверхности водосброса плотины № 3. Третий случай эксплоатации: водосливные отверстия открыты на 1,5 *м*, донные закрыты. Г. В. Б. = 127,11 *м*, Г. Н. Б. = 114,45 *м*, $Q = 187{,}2$ *м*³/*сек*:

1 — пьезометрические давления на сплошной водосливной кривой; *2* — то же на водосливной кривой расположенной над донными отверстиями

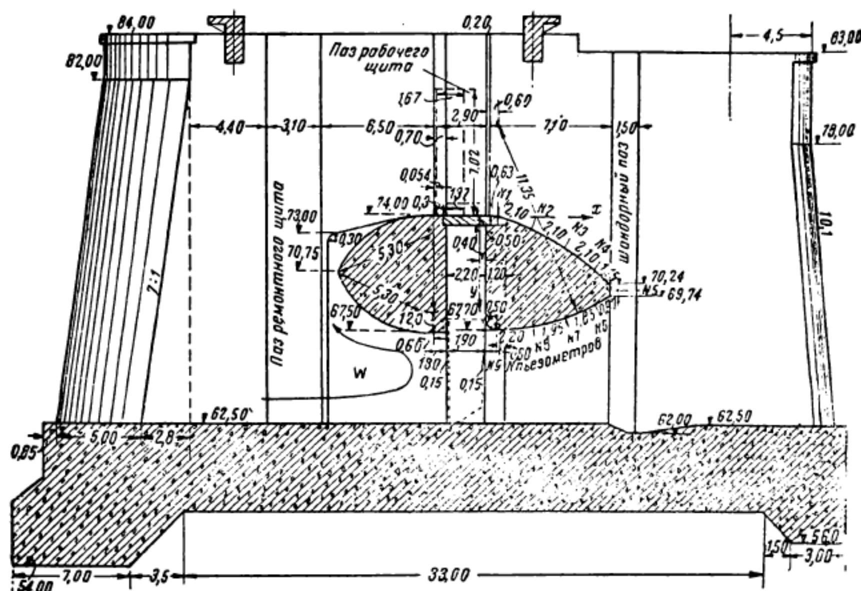
Величины пьезометрических давлений для натуры (пересчитанные с модели по линейному закону

№ пьезометров	1	2	3	4	5	6	7	8
Пьезометрические высоты в *м* вод. ст.	+0,56	+0,61	+0,50	+0,46	+0,90	+0,89	+0,48	+0,68

уравнению $y = Ax^2$ в большинстве случаев получается весьма близким к нему; и только в некоторых случаях в целях избежания образования вакуумов на сливной поверхности для сооружений канала были приняты профили (по уравнению $y = Ax^2$), несколько более полные по сравнению с очертанием по координатам Кригера.

2. ВОДОСЛИВ НЕПОЛНОГО ПРОФИЛЯ (ПРОМЕЖУТОЧНАЯ БАЛКА) ВОДОПРОПУСКНЫХ ПРОЛЕТОВ

Примерами водосливов неполного профиля, осуществленных на канале Москва — Волга и исследованных в лаборатории, служат часть бетонной плотины № 11 (водопропускные пролеты) и водопропускная часть водосброса земляной плотины № 3, где наряду с отверстиями, имеющими пороги в виде поверхностного водослива полного профиля, устроены и донные отверстия.



Фиг. 20. Разрез по водопропускному пролету (с промежуточной балкой) плотины № 11 (по эскизному проекту). Уравнение водосливной кривой: $y=0,0672\,x^2$

Пунктиром показаны габариты верхнего и нижнего щитов, примененных при испытаниях.

Очертание водосливной части для этих двух случаев имеет некоторые особенности.

Случай 1. Бетонная плотина № 11. Промежуточная балка водопропускного пролета бетонной плотины № 11 (фиг. 20) представляет первый типовой случай, довольно часто встречающийся в гидротехнической практике. Этот случай характерен тем, что промежуточную балку обтекают два потока: по верхней поверхности балки происходит свободный излив подобно водосливу полного профиля, а с нижней стороны ее обтекает поток, вытекающий через донные отверстия.

Таким образом в данном случае имеет место полное обтекание тела потоком.

В результате предварительных опытов, проведенных по исследованию проектного очертания промежуточной балки, лабораторией были внесены соответствующие изменения в форму ее очертания:

1. Водосливная кривая балки (верхняя ее поверхность) была построена по уравнению $y = 0{,}046\ x^2$, полученному, исходя из скорости нижней струйки, имеющей начальную скорость:

$$v_{max} = \varphi \sqrt{2\,gH_0} = 0{,}95 \cdot 4{,}43 \sqrt{6{,}0} = 10{,}3\ м/сек,$$

соответствующую случаю открытия щита на гребне всего на 1,0 *м*.

2. Нижнее очертание балки, особенно хвостовой ее части, было установлено, исходя из соображений, чтобы во время истечения из нижнего (донного) отверстия при полностью открытом нижнем щите эта часть поверхности балки была по возможности безвакуумной. Для этого необходимо было найти такой радиус закругления нижней поверхности балки, при котором возникающие при обтекании балки силы инерции ($J = \frac{mv^2}{r}$, где m — масса единицы объема воды, v — скорость обтекания, r — радиус закругления) были бы уравновешены внешним давлением среды.

Выполняя это условие, радиус закругления определяли по формуле [1]:

$$r = \frac{mv^2}{z - \frac{v^2}{2\,g}} \tag{5}$$

при $v = \varphi \sqrt{2\,gH}$.

Полученным с округлением радиусом $r = 30$ *м* была очерчена нижняя поверхность балки, начиная от передней кромки внутреннего паза; при этом в целях соблюдения (по конструктивным соображениям) отметки хвостовой кромки 69,74 для плавного сопряжения нижней поверхности балки с кромкой выхода в конце балки было допущено закругление с радиусом $r_1 = 0{,}80$ *м* (фиг. 21).

3. Очертание носовой части балки в целях улучшения условий подхода струй в верхнем бьефе было выбрано с таким расчетом, чтобы угол наклона прямой, соединяющей нос балки с началом верхней горизонтальной площадки, составлял около 45° и чтобы очертание входа в нижнее отверстие было достаточно плавное.

Для выполнения этих условий были приняты (фиг. 21): для верхнего очертания носовой балки плавная коробовая кривая с радиусами 15, 12 и 3,10 *м*; для нижнего очертания — кривая с радиусом 11,0 *м* в соответствии с основными соотношениями, рекомендуемыми Кригером для плавно обтекаемых быков и устоев.

В результате произведенных опытных исследований [2] были установлены эпюры распределения давлений по поверхности промежуточной балки при различных случаях эксплоатации, представленные в развернутом виде на фиг. 21.

Рассмотрение приведенных данных позволило сделать следующие основные выводы, рекомендованные лабораторией к разработке в проекте:

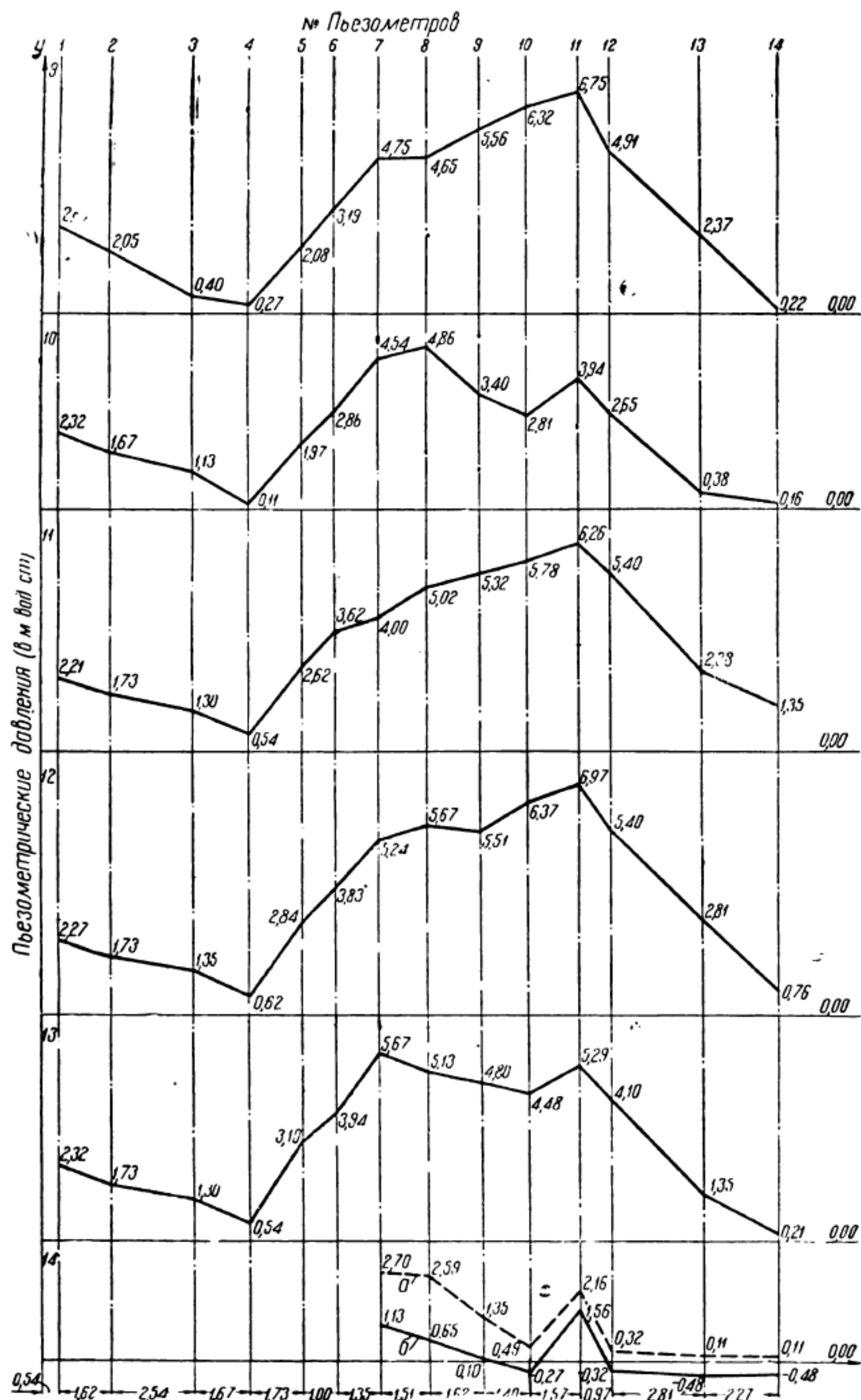
1. При предложенном лабораторией и принятом далее в проекте очертании промежуточной балки вакуумы наблюдаются только на нижнем участке водосливной кривой и лишь при некоторых наиболее невыгодных для работы балки случаях эксплоатации; в остальных случаях поверхность балки подвержена лишь положительным давлениям. Максимальная величина вакуума (в пьезометре № 4) достигала 0,60 *м* (при линейном пересчете на натуру давления, измеренного на модели). Как показали опыты, причиной образования вакуума являлся местный изгиб струй при сходе с водосливной поверхности балки. Несмотря на незначительные и безопасные для сооружения вакуумы в конце водосливной поверхности, лаборатория, проведя дополнительный цикл опытов, установила целесообразность спрямления низового участка кривой на протяжении 3,40 *м* (по касательной к точке на кривой водослива, расположенной на том же расстоянии от конца балки — прямая *Б — В* на фиг. 21). При таком сопряжении конечная

---

[1] А. Я. Милович, Основы динамики жидкости, 1933, стр. 27.
[2] Исследования проводились в плоском лотке в масштабе 1 : 54.

Фиг. 21. Разрез по водопропускному пролету и эпюры пьезометрических давлений по рианту

1 — поперечный разрез балки с указанием расположения пьезометров; *2* — случай № 1 — верхний щит то же (Г. В. Б. = 77,00; Г. Н. Б. = 66,80); *4* — случай № 3 — то же (Г. В. Б. = 78,00; Г. Н. Б. = 68,60); спрямленным низовым участком водосливной кривой (см. *Б — В* на разрезе *1*) — пунктирная кривая]; *6* — ленными низовыми участками водосливной кривой — пунктирная кривая — Г. В. Б. = 80,00; Г. Н. Б. = открыт на 1,0 *м*, нижний щит закрыт (Г. В. Б. = 80,00; Г. Н. Б. = 66,00); *9* — случай № 7 — верхний — № 7 а — верхний и нижний щиты открыты полностью (Г. В. Б. = 80,00; Г. Н. Б. = 74,40); *11* — слу- =74,90); *12* — случай № 9 — верхний щит открыт полностью, нижний щит открыт на 4,0 *м* (Г. В. =80,00; Г. Н. Б. =76,10); *14* — случай № 11 (теоретический) — верхний щит закрыт, нижний щит открыт тает без подтопа — Г. В. Б. =



поверхности промежуточной балки бетонной плотины № 11 при очертании балки по ва-
лаборатории:

открыт полностью, нижний щит закрыт (отметка Г. В. Б. = 74,50; Г. Н. Б. = 64,20); *3* — случай № 2 —
5 — случай № 4 — то же [Г. В. Б. = 79,00; Г. Н. Б. = 70,80. При очертании промежуточной балки со
случай № 5 — то же (Г. В. Б. = 80,00; Г. Н. Б. = 71,80. При очертании промежуточной балки со спрям-
72,20); 7 — случай № 5 а — то же (Г. В. Б. = 80,00; Г. Н. Б. = 69,70); *8* — случай № 6 — верхний щит
щит открыт полностью, нижний щит открыт на 1,0 *м* (Г. В. Б. = 80,00; Г. Н. Б. = 74,20); *10* — случай
чай № 8 — верхний щит открыт полностью, нижний щит открыт на 2,5 *м* (Г. В. Б. = 80,00; Г. Н. Б. =
Б. = 80,00; Г. Н. Б=45,70); *13* — случай № 10 — верхний и нижний щиты открыты полностью (Г. Б. В. =
полностью (*а* — отверстие работает с подтопом — Г. В. Б. = 80,00; Г. Н. Б = 74,20; *б* — отверстие рабо-
80,00; Г. Н. Б. = 72 70).

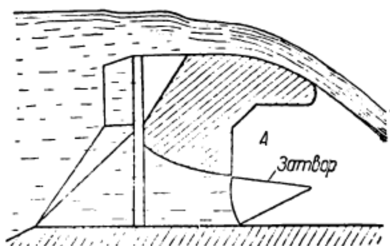
точка водосливной поверхности поднялась на 0,38 *м*, и наблюдавшееся ранее отрицательное давление в пьезометре № 4 (фиг. 21) перешло в устойчивое положительное давление. Хотя на основе этого и нельзя утверждать, что в самом конце водосливной поверхности вакуумы устранены полностью, тем не менее указанное спрямление существенно сократило вакуумный участок кривой и явилось поэтому рациональным.

2. При исследованиях обтекания нижнего очертания балки небольшая вакуумность (—0,27 *м* в натуре) возможна лишь во внутреннем щитовом пазу и только при отсутствии подтопления со стороны нижнего бьефа. При затоплении со стороны нижнего бьефа вытекающей из-под балки струи все отмеченные вакуумы переходят в положительные давления.

Таким образом опыты показывают полную удовлетворительность полученного указанным выше способом очертания промежуточной балки.

3. Следует отметить, что во избежание вакуумности в хвостовой (вертикальной) части балки при переливе через нее воды и низких горизонтах нижнего бьефа рациональным является обеспечение подвода под струю воды воздуха из атмосферы.

Случай 2. Водосброс при земляной плотине № 3. Второй случай очертания промежуточной балки, осуществленный на водосбросе земляной плотины № 3, характерен тем, что поток, свободно переливающийся через гребень водослива (фиг. 22), движется некоторое время по водосливной поверхности и затем переходит в свободное падение. При этом в силу того, что зона *А* оказывается замкнутой со стороны нижнего бьефа водяной струей, в ней образуется пониженное давление, которое без сомнения оказывает влияние на поведение струи и распределение давлений по водосливной поверхности.



Фиг. 22. Схема водосброса земляной плотины № 3 (разрез по промежуточной балке).

Проведенные исследования показали, что водосливная поверхность, будучи очерчена по изложенному выше принципу, должна быть в концевой своей части несколько изменена. Непосредственные наблюдения показали, что для данного очертания в пьезометре, расположенном на расстоянии 1,0 *м* от конца балки, наблюдается вакуум до — 0,62 *м*.

Анализируя это явление, лаборатория установила в данном случае помимо изгиба струй при сходе с водосливной поверхности влияние пониженного давления в зоне *А* на величину и распределение пьзометрических давлений в хвостовой части промежуточной балки. Путем соответствующего экспериментального и теоретического изучения было установлено новое, более полное очертание промежуточной балки (подобно очертанию промежуточной балки плотины № 11), приведенное на фиг. 18 — 19 (см. участок *А* — *В*).

Однако это рекомендуемое лабораторией изменение по чисто конструктивным соображениям произведено не было (трудность сопряжения между собой в одном пролете водосливных поверхностей различного очертания — см. фиг. 44). Вместе с тем относительно небольшая величина вакуума, не являющаяся сколько-нибудь опасной для сооружения, позволила ограничиться здесь лишь осуществлением свободной и достаточной подачи под струю атмосферного воздуха. Последнее было осуществлено на сооружении с помощью специальных воздухопроводных галлерей, расположенных в береговых устоях.

Данные, иллюстрирующие сказанное, приведены в табл. 6.

Данные при измененном очертании хвостовой балки приведены в таблицах, помещенных на фиг. 18 и 19.

Резюмируя приведенные данные по очертанию водосливных поверхностей неполного профиля (промежуточных балок), можно установить следующее:

1. Очертание неполного водосливного профиля (промежуточной балки) при

Таблица 6

Схемы эксплоатации	№ пьезометров (фиг. 18)	
	7	8
	Пьезометрические давления в *м* вод. ст. (для натуры)	
1. Водосливные отверстия открыты полностью; Г. В. Б. = = 127,60 *м*	1,42	−0,62
2. Водосливные отверстия открыты полностью; Г. В. Б. = = 127,11 *м*	1,32	−0,56
3. Водосливные отверстия открыты на 1,5 *м*; Г. В. Б. = = 127,11 *м*	0,92	−0,56
4. Водосливные отверстия открыты на 0,5 *м*; Г. В. Б. = = 127,11 *м*	0,44	−0,34
5. Донные отверстия открыты на 1,5 *м*, водосливные — полностью	0,78	0,00
6. Донные и водосливные отверстия открыты полностью	1,28	−0,24

наличии двухстороннего ее обтекания или же свободного пространства под струей может быть определено по принятому в лаборатории закону свободно падающей струйки с той лишь разницей, что этот профиль должен быть принят несколько более полным. Последнее может быть достигнуто или за счет некоторого (на 8 — 10%) уменьшения коэфициента A в уравнении $y = Ax^2$ или же за счет спрямления хвостовой части очертания (по касательной к точке на водосливной кривой, в данном случае — на протяжении 3 — 4 *м*).

2. Наличие под струей (под балкой) зоны с пониженным давлением оказывает существенное влияние на величину и распределение пьезометрических давлений, понижая величину последних за счет увеличения изгиба струек при их сходе с водосливной поверхности. Во всех этих случаях является необходимым обеспечить свободный доступ воздуха под струю.

Отсутствие свободного доступа под струю атмосферного воздуха, вызывая образование зоны пониженного давления, оказывает влияние не только на распределение давлений по водосливной поверхности, но и на поведение струи при ее свободном падении. В силу непостоянства (колебания) давления под струей появляется заметное и весьма устойчивое нежелательное биение сливающейся с водосливной поверхности струи воды.

3. КОЭФИЦИЕНТЫ РАСХОДА ВОДОСЛИВНЫХ И ДОННЫХ ОТВЕРСТИЙ

Приводим данные о коэфициентах расхода основных сооружений канала.

а) Плотина № 11

Полный водосливной профиль. Коэфициенты расхода определялись без учета бокового сжатия промежуточными бычками (плоская задача; модель 1 : 30) для полностью открытого затвора и при разных его открытиях (0,5 и 1,0 *м*, что соответствует $1/_{12}$ — $1/_6$ напора).

Результаты опытов приведены в табл. 7 [1] и на фиг. 23.

[1] Коэфициенты расхода при свободном переливе подсчитывались по формуле:

$$m = \frac{Q}{b \cdot H_0 \sqrt{2gH_0}},$$

где

$$H_0 = H + \frac{v_0^2}{2g};$$

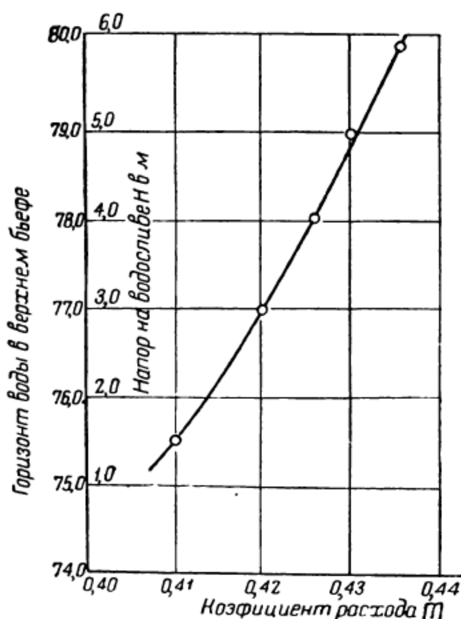
b — длина водослива по гребню без учета бокового сжатия, а при истечении из-под щита по формуле:

$$\mu = \frac{Q}{ab\sqrt{2g\left(H_1 - \frac{a}{2}\right)}},$$

где H_1 — глубина воды перед щитом (над порогом);
a — величина открытия щита;
остальные обозначения — прежние.

Таблица 7

№ п/п	Отметка верхнего бьефа	Удельный расход q в $м^3/сек$	Напор на водосливе H	Коэфициенты расхода m (при полностью открытом щите) и μ (при истечении из-под щита)
	Щит на водосливе открыт полностью			
1	75,50	3,08	1,50	0,412
2	77,00	9,60	3,00	0,420
3	78,00	15,50	4,00	0,426
4	79,00	22,30	5,00	0,431
5	Н. П. Г. 80,00	30,60	6,00	0,436
	Щит открыт на 0,5 *м*			
6	80,00	3,65	6,00	0,637
	Щит открыт на 1,0 *м*			
7	80,000	7,17	6,00	0,637



Фиг. 23. Кривая коэфициентов расходов бетонной плотины № 11 при свободном переливе (водосливной пролет).

Неполный водосливной профиль (промежуточная балка). Результаты опытов, проведенных в условиях плоской задачи на модели 1 : 5 для определения коэфициентов расхода при переливе через балку, приведены в виде кривой на фиг. 24 и в табл. 8.

Коэфициент расхода при истечении из-под верхнего щита, поднятого на 1 *м*, был определен равным 0,658.

Сопоставляя приведенные данные, нетрудно заметить, что при одних и тех же гидравлических условиях коэфициенты расхода для водослива неполного профиля (промежуточной балки) несколько (6 — 15%) ниже, чем для полного водосливного профиля.

Наличие подобной разницы в коэфициентах расхода, а следовательно и в пропускной способности подтвердилось и при повторных исследованиях этих сооружений на пространственной модели (масштаб 1 : 80). Так, пропускная способ-

Таблица 8

Отметка горизонта воды верхнего бьефа в *м*	Напор на водосливе H в *м*	Расход воды [1] Q в $м^3/сек$	Удельный расход q в $м^3/сек$ на 1 *пог. м*	Коэфициенты расхода m
75,50	1,5	51,5	2,57	0,315
77,00	3,0	170,0	8,49	0,368
78,00	4,0	279,0	14,93	0,389
79,00	5.0	408,0	20,40	0,405
80,00	6,0	548,0	27,48	0,414

[1] Расходы пересчитаны с модели на натуру (для одного пролета) по закону Фруда без учета боковых сжатий.

ность одного водосливного пролета оказалась равной 546 $м^3/сек$, тогда как при тех же условиях (горизонт верхнего бьефа на отм. 124,00) пропускная способность одного водопропускного пролета (при закрытом нижнем щите) определилась в 500 $м^3/сек$ (разница примерно 9% против 6% в плоской задаче при масштабе модели 1 : 30).

б) Водосброс при земляной плотине № 3

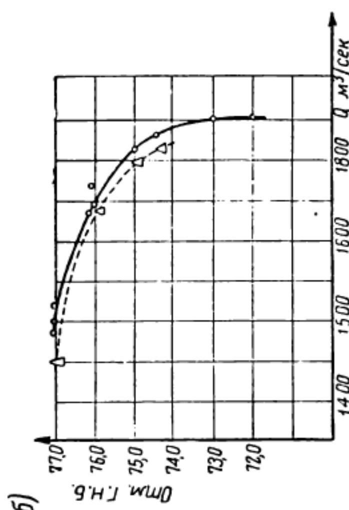
Данные по коэфициентам расхода, полученные на пространственной модели 1 : 40 для этого сооружения, приведены на фиг. 25; они показывают, что коэфициенты расхода водослива при свободном переливе колеблются в пределах от 0,39 до 0,44.

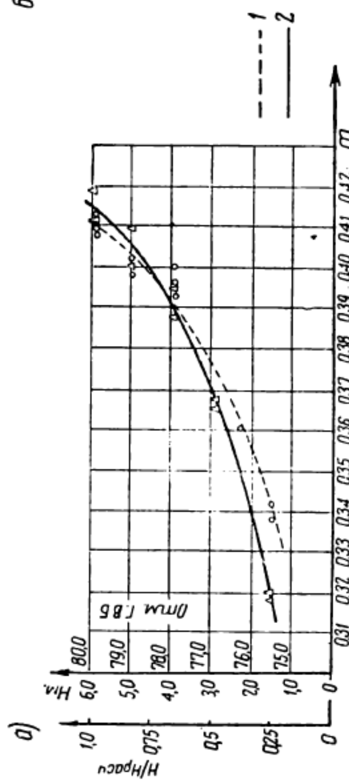
Не приводя данных по коэфициентам расхода иных сооружений, ограничимся лишь некоторыми общими замечаниями, которые могут быть сделаны на основании проведенных исследований:

1. Величины полученных коэфициентов расхода (0,39 — 0,44) достаточно близко совпадают с данными, обычно приводимыми в литературе. Так например, для случая плотины № 11 с ее низким и растянутым профилем коэфициент расхода по данным акад. Н. Н. Павловского[1] может быть определен равным 0,43 — 0,44.

2. Горизонтальные вставки на гребне водослива и уширение гребня (более распластанное очертание), обусловленные требованиями конструктивного порядка, уменьшают пропускную способность плотины. По данным опытов лаборатории можно считать, что длина горизонтальной вставки на гребне водослива, равная $^1/_{10}$ — $^1/_{15}$ от напора на водосливе, не оказывает заметного влияния на коэфициенты расхода.

Остановимся теперь на характеристике коэфициентов расхода при истечении из-под затворов, устанавливаемых на гребне водосливов (на всех рассматриваемых и исследованных в лаборатории Строительства сооружениях на гребне водосливов устанавливались металлические плоские или сегментные затворы).





Фиг. 24. Кривые зависимости коэфициентов расхода и расходов водопропускного пролета бетонной плотины № 11 от горизонтов верхнего и нижнего бьефов (величины *H*, *Q* и отметки Г. В. Б. и Г. Н. Б. пересчитаны на натуру по закону Фруда с модели 1 : 30):

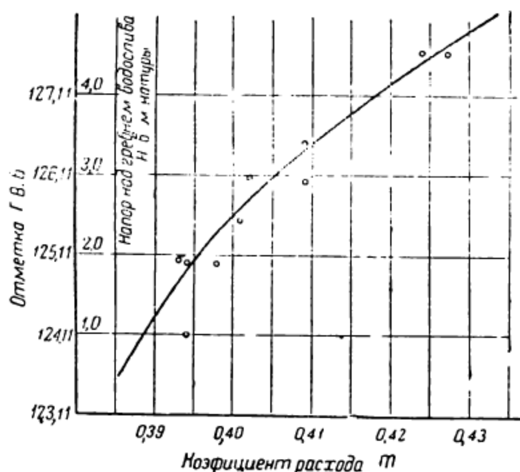
а — кривые $m = f(H)$ при переливе через промежуточную балку; все нижние щиты закрыты; *б* — кривые $Q = \varphi$ (Г. Н. Б.) для случая полностью открытого водопропускного пролета и Г. В. Б. = 80,0 *м*; *1* — при очертании промежуточной балки по эскизному проекту (сливная часть балки очерчена по Кригеру), *2* — то же по варианту лаборатории

[1] Акад. Н. Н. Павловский, Гидравлический справочник, 1937, стр. 392, тип III *b* 4°.

Приводим результаты опытов.

Для водосброса при плотине № 3 коэфициенты расхода при истечении из-под затворов определялись в зависимости от величины открытия последних при постоянном горизонте в верхнем бьефе на отм. 127,11 *м* (фиг. 26).

Во всех случаях определение коэфициентов расхода производилось при симметричной работе одноименных отверстий в обоих пролетах (фиг. 44). При этом горизонт воды в нижнем бьефе устанавливался в соответствии с пропускаемым расходом. Во всех случаях работы донных отверстий получался случай неподтопленного отверстия.



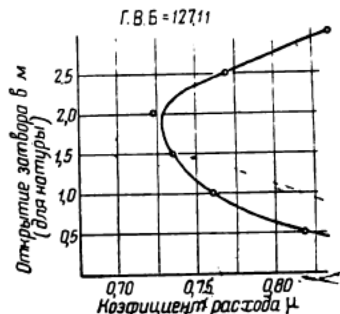
Фиг. 25. Исследования модели водосброса земляной плотины № 3. Коэфициенты расхода при свободном переливе через водослив и симметричной работе одноименных отверстий в обоих пролетах

В результате произведенных испытаний были получены коэфициенты расхода, графически изображенные на фиг. 26 и 27. Вид этих кривых достаточно правильный и пояснений не требует.

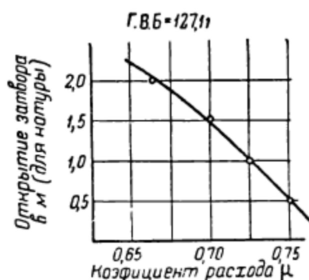
По данным графиков можно установить, что коэфициенты расхода при истечении из-под затворов на гребне водослива изменяются в пределах от 0,65 до 0,75, а коэфициенты расхода при истечении из-под затворов донных отверстий — в пределах 0,725 — 0,83.

Анализ полученного материала позволил установить следующее.

1. Влияние типа установленного на гребне затвора (сегментного или плоского) опытами не улавливается, так как основными факторами, влияющими на



Фиг. 26. Исследование модели водосброса плотины № 3. Коэфициенты расхода при истечении из-под затворов на гребне водослива и симметричной работе одноименных отверстий в обоих пролетах



Фиг. 27. Исследования модели водосброса плотины № 3. Коэфициенты расхода при истечении из-под затворов донных отверстий и симметричной работе одноименных отверстий в обоих пролетах

величину коэфициента расхода, являются условия подхода струй к отверстию и характер нижней кромки затвора (что не могло быть достаточно точно воспроизведено на модели).

2. Значительное влияние на величину коэфициента расхода оказывает степень кривизны водосливной поверхности за затвором. Это особенно заметно при

сопоставлении данных, полученных для бетонной плотины № 11. В этих исследованиях очертание верхней поверхности промежуточной балки первоначально было установлено по уравнению $y=0{,}0672\ x^2$, а затем изменено по $y=0{,}046\ x^2$. Опыты дали следующие величины коэфициентов расхода при различном очертании водосливной поверхности (табл. 9).

Эта разница была бы еще более заметной, если бы во втором случае не была изменена входная часть балки (большее заглубление входной кромки балки), улучшающая условия подхода и следовательно способствующая увеличению коэфициента расхода.

Таблица 9

Отметка верхнего бьефа	Коэфициенты расхода m	
	$y=0.0672\ x^2$	при $y=0{,}046\ x^2$
75,5	0,340	0,315
77,0	0,376	0,367
78,0	0,391	0,389
79,0	0,400	0,405
80,0	0,412	0,414

4. ВЕЛИЧИНА ОТКРЫТИЯ ЗАТВОРА, ПРИ КОТОРОМ НЕ ПРОИСХОДИТ ПОДСАСЫВАНИЯ ЛЬДА ПОД ЗАТВОР

Произведенные с этой целью в лаборатории Строительства канала исследования как в плоском решении (в зеркальном лотке) на моделях крупных масштабов (1 : 20 — 1 : 40), так и в пространственном решении на моделях более мелкого масштаба (1 : 40 — 1 : 150) позволили установить предельное открытие затвора, при котором не происходит подсасывания из верхнего бьефа льда и плавающих тел. В результате опытов было установлено, что предельное открытие затвора a составляет $^1/_6$ часть от общего напора на гребне водослива, т. е.

$$a=\frac{H}{6}, \qquad (6)$$

где a — величина открытия затвора, а H — напор на гребне водослива.

Следует отметить, что эта величина открытия затвора подтвердилась исследованиями в натуре на бетонной плотине № 11.

Резюмируя изложенное о водопропускных устройствах плотин, можно установить следующие основные положения:

1. Водосбросные сооружения канала Москва — Волга, очертания которых были проверены лабораторными исследованиями, обеспечивают нормальный пуск паводковых вод требуемой величины. Принятые очертания входных граней водосливов и донных отверстий и очертания водосливных поверхностей дают при этом достаточно удовлетворительные величины коэфициентов расхода.

2. Исключается возможность образования вакуумов на водосливных поверхностях, чем обеспечиваются благоприятные условия работы сооружений.

ГЛАВА IV

ИССЛЕДОВАНИЯ ГАШЕНИЯ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПОТОКА В НИЖНЕМ БЬЕФЕ СООРУЖЕНИЙ

Основная задача исследования условий гашения кинетической энергии потока в нижнем бьефе заключается в отыскании тех простейших и экономичных мероприятий, которые бы на коротком пути движения воды в нижнем бьефе сооружения доводили скорости течения потока до размера бытовых. При современных наших знаниях в области гидравлики лишь крайне небольшая часть этих мероприятий может быть определена путем предварительных теоретических расчетов, притом весьма приближенных.

Единственным средством для успешного разрешения подобных вопросов являются до настоящего времени лабораторные исследования. Отсутствие достаточно подробных систематических исследований условий гашения энергии потока и подбора наилучших типов гасителей вынудило лабораторию Строительства канала направить свои работы в этой области по пути отдельных экспериментов, к сожалению не всегда еще связанных в единую систему. Проводить же

общие углубленные систематические исследования по гашению энергии в нижнем бьефе не представлялось возможным ввиду необходимости срочно давать для строительства надежные решения для совершенно конкретных случаев.

Ниже описаны основные, наиболее характерные и технически интересные решения, полученные лабораторией, и дано несколько обобщающих выводов.

1. КРИТЕРИИ, ПРИНЯТЫЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ УСЛОВИЙ ГАШЕНИЯ ЭНЕРГИИ В НИЖНЕМ БЬЕФЕ СООРУЖЕНИЯ

Основными показателями удовлетворительной работы системы гасителей и наличия благоприятных условий гашения кинетической энергии потока в нижнем бьефе сооружения в лаборатории Строительства были приняты следующие:

1) наличие за гасителями поверхностного режима, постепенно переходящего в равномерный режим, присущий данному водотоку; это условие характеризуется наличием малых донных скоростей за последним рядом гасителей;

2) наличие гидравлически спокойного режима в нижнем бьефе (относительно спокойное состояние водной поверхности и сравнительно плавное изменение скоростей по вертикали); это условие характеризует степень устойчивости и величину пульсаций давлений и скоростей;

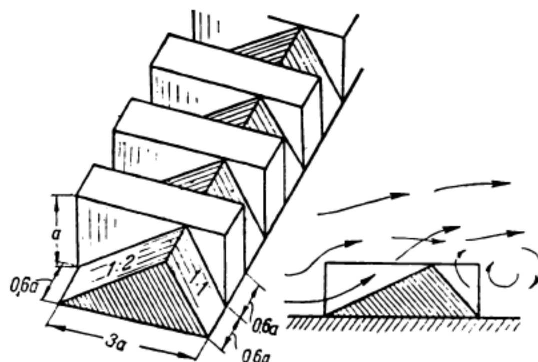
3) наличие правильного и равномерного распределения скоростей в плане;

4) наличие достаточно благоприятных условий для пропуска и отгона от сооружения сбрасываемых через него льда и плавающих тел;

5) экономичность, простота и надежность конструкции гасителей; это последнее условие является решающим при выборе окончательного способа гашения энергии при наличии равных в гидравлическом отношении типов гасителей.

В силу большого различия как в гидравлических условиях гашения энергии, так и в требованиях, предъявляемых к отдельным сооружениям, степень важности того или иного показателя устанавливалась для каждого сооружения в отдельности.

Помимо чисто гидравлических показателей (величина и направление скоростей, распределение скоростей в плане и по вертикали и т. д.), получаемых на моделях с неразмываемым руслом, при выборе окончательного решения в наиболее ответственных случаях проводилась проверка работы гасителей по характеру и размерам размывов ложа за сооружением, т. е. проводились опыты на моделях с размываемым руслом. Эта проверка, имевшая лишь качественный характер, являлась вполне надежной и объективной при сравнении работы различных типов гасителей между собой.



Фиг. 28. Зубчатый порог. Общий вид, соотношение размеров и гидравлическая схема работы

2. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ГАСИТЕЛЕЙ, ПРИМЕНЕННЫЕ НА СООРУЖЕНИЯХ КАНАЛА

В решениях, полученных лабораторией для сооружений канала, наибольшее распространение получили зубчатые и сплошные треугольные пороги («трамплины»), давшие вполне благоприятные результаты.

На фиг. 28 приведены общий вид, гидравлическая схема работы зубчатого порога и его основные относительные размеры.

Гидравлическая схема работы зубчатого порога, достаточно ясно наблюдавшаяся при опытах в плоском лотке, в основном сводится к следующему: поток с помощью вертикальных зубьев расщепляется на отдельные струйки; с помощью указанных зубьев и наклонных плоскостей создаются встречные дви-

жения отдельных струек и донный валец за порогом, в результате чего рабочая часть потока направляется к его поверхности. Обширные исследования, проведенные с применением гасителя этого типа, показали вполне удовлетворительные результаты.

Треугольный порог с пологой верховой гранью применялся лабораторией обычно с целью отвода потока от дна к поверхности, т. е. служил как бы трамплином. Применение такого порога имело место при отсутствии у плотины носка, а также в тех случаях, когда по тем или другим соображениям необходимо было непосредственно за сооружением создать донный режим с переводом рабочей части потока на поверхность.

Не останавливаясь на гасителях иных типов, примененных на отдельных немногих сооружениях и потому не являющихся типовыми, перейдем к описанию наиболее характерных и интересных с гидравлической точки зрения решений.

3. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ОСНОВНЫХ СИСТЕМ ГАСИТЕЛЕЙ, ПРИМЕНЕННЫХ НА СООРУЖЕНИЯХ КАНАЛА МОСКВА—ВОЛГА

а) Сопряжение бьефов и гашение энергии, примененные на водосливном пролете бетонной плотины № 11[1]

Основным требованием, которое было поставлено перед лабораторией в связи с исследованиями водосливного пролета плотины № 11, являлось следующее: для безопасного отвода льда от плотины необходимо было достигнуть сопряжения струи, сходящей с водосливной поверхности, с нижним бьефом в виде отогнанного поверхностного прыжка, получаемого при помощи трамплина (носка), устроенного в конце водосливной поверхности по примерам Волховской, Свирской и Днепровской плотин. При исследовании же гашения энергии струи необходимо было подобрать наилучший тип и размеры гасителя энергии, располагаемого в конце водобоя, и установить минимальную безопасную длину креплений за ним. При этом все исследования должны были производиться для двух случаев:

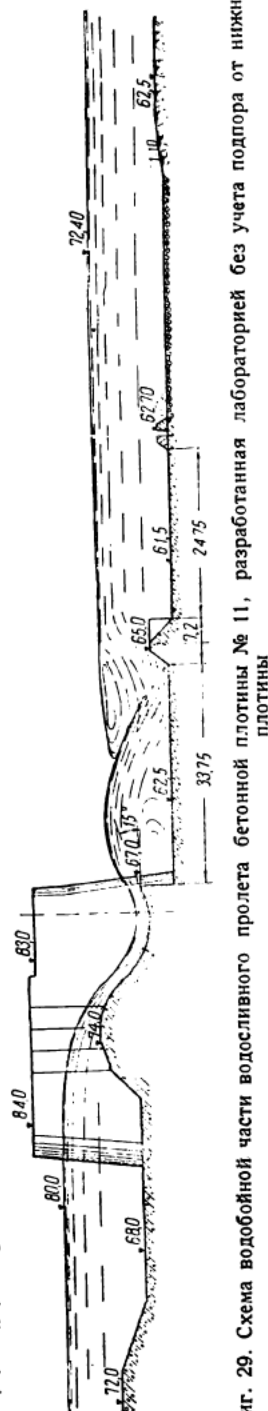
1) при подпоре со стороны нижележащей плотины, проектируемой в нижнем бьефе бетонной плотины № 11, и

2) при бытовых горизонтах реки, т. е. без учета подпора со стороны нижней плотины.

Гидравлические условия при подборе трамплина и гасителей сводились к следующему: горизонт воды верхнего бьефа 80,00 *м*; горизонт воды нижнего бьефа колеблется в пределах отм. 72,0 — 63,2 *м*, т. е. в пределах 8,80 *м*.

Максимальный удельный расход при полностью открытом затворе равен $q = 31{,}3$ *м³/сек*.

В результате опробования ряда схем устройства носка[2] плотины и различных схем гасителей лучшие



Фиг. 29. Схема водобойной части водосливного пролета бетонной плотины № 11, разработанная лабораторией без учета подпора от нижней плотины

[1] Исследование в плоском решении проведено под руководством инж. Б. Ф. Караулова, на пространственных моделях — под руководством инж. А. И. Козловского.

[2] В плоском лотке в масштабе 1 : 30.

результаты были получены при устройстве пологого носка (трамплина) и системы гасителей, приведенных на фиг. 29.

Очертание трамплина состояло из двух круговых кривых с радиусами 7,20 и 11,0 *м* и параболической вставки, сопрягавшей последнюю круговую кривую с конечной направляющей площадкой длиной 1,50 *м* (фиг. 30).

Такое очертание было запроектировано из следующих соображений. При максимальных расходах и горизонтах нижнего бьефа зона поверхностного режима могла бы быть несколько расширена, если для нижней части трамплина (на подъеме) выбрать очертание с меньшей кривизной и направляющей прямой достаточной длины (в данном случае — не менее 1,50 *м*). Очевидно, что очертание трамплина зависело здесь от максимальной толщины сходящей с него струи; при этом с увеличением толщины струи должна была увеличиваться и длина конечного направляющего участка, чтобы струя при сходе с трамплина успела принять требуемое направление по всему своему живому сечению. Уменьшение кривизны при подходе к плоскому направляющему участку имело то же значение, что и удлинение последнего. Учитывая, что в данном случае нормальная толщина струи h при сходе с трамплина составляла около 2,0 *м*, нижний направляющий

Фиг. 30. Очертание трамплина (носка) бетонной плотины № 11

участок (на подъеме) трамплина был достаточно развит и устроен на длине, равной $l = 3\ h = 6{,}0$ *м*, с отметкой конечной точки носка 67,00 *м*.

Водобой за сооружением, расположенный на отм. 62,5 *м*, имел длину 33,75 *м* и оканчивался в нижней (по течению) части водобойной стенкой трапецоидального сечения высотой 2,50 *м* с зубьями с низовой его стороны (фиг. 29). Назначение этой стенки сводилось по существу к недопущению на водобое отгона прыжка при больших расходах и низких горизонтах нижнего бьефа.

Для гашения кинетической энергии потока в нижнем бьефе из опробованных вариантов, проверенных на опытах с размывами в нижнем бьефе, в окончательном решении был принят вариант устройства двух рядов отдельных пирсов высотой 1,20 *м*, располагаемых (фиг. 29) в шахматном порядке на расстоянии 24,75 *м* от нижней грани трапецоидального порога.

Кроме того для предохранения рисбермы от подмывов со стороны нижнего бьефа за нею был установлен предохранительный плот («гребенка»).

Опыты, проведенные на моделях, выполненных в соответствии с описанной выше окончательной схемой устройства носка плотины и системы гасителей, позволили отметить следующее:

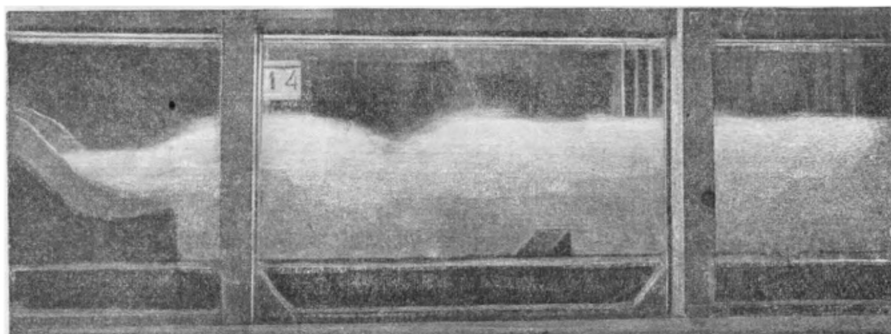
1. Устройство носка плотины с отметкой конечной его грани 67,0 обеспечивает создание устойчивого поверхностного режима при всех случаях эксплоатации, в основном в пределах, заданных при исследованиях.

Приводимая табл. 10 иллюстрирует сказанное.

Таблица 10

Случаи эксплоатации	Горизонты верхнего бьефа	Удельные расходы q в $м^3/сек$	Отметки Г. Н. Б., при которых на водобое донная струя переходит в поверхностную	Требуемый нижний предел поверхностного режима (Г. Н. Б.)	Верхние пределы Г. Н. Б., при которых сохраняется устойчивость поверхностного режима		
					требуемые	полученные	разница
Открыты полностью 1—8 верхних затворов	75,50	3,08	66,84	65,00	68,90	68,76	+ 0,14
То же	77,00	9,60	67,92	68,50	70,70	70,64	+ 0,06
От одного затвора, открытого полностью, и 7 затворов, открытых на 0,5 *м*, до 8 затворов, открытых полностью	78,00	15,50	69,90	70,20	72,20	71,64	+ 0,55
От одного затвора, открытого полностью, и 7 затворов, открытых на 0,75 *м*, до 8 затворов, открытых полностью	78,00	22,30	71,13	72,00	73,00	72,80	+ 0,20
От одного затвора, открытого полностью, и 7 затворов, открытых на 1,0 *м*, до 8 затворов, открытых полностью	80,00	30,60	72,51	73,50	73,50	74,00	— 0,50

В случае повышения горизонта нижнего бьефа свыше отм. 74,00 *м* сначала наступает неустойчивый поверхностный режим, а затем затопление поверхностного прыжка с образованием поверхностного вальца над трамплином. На

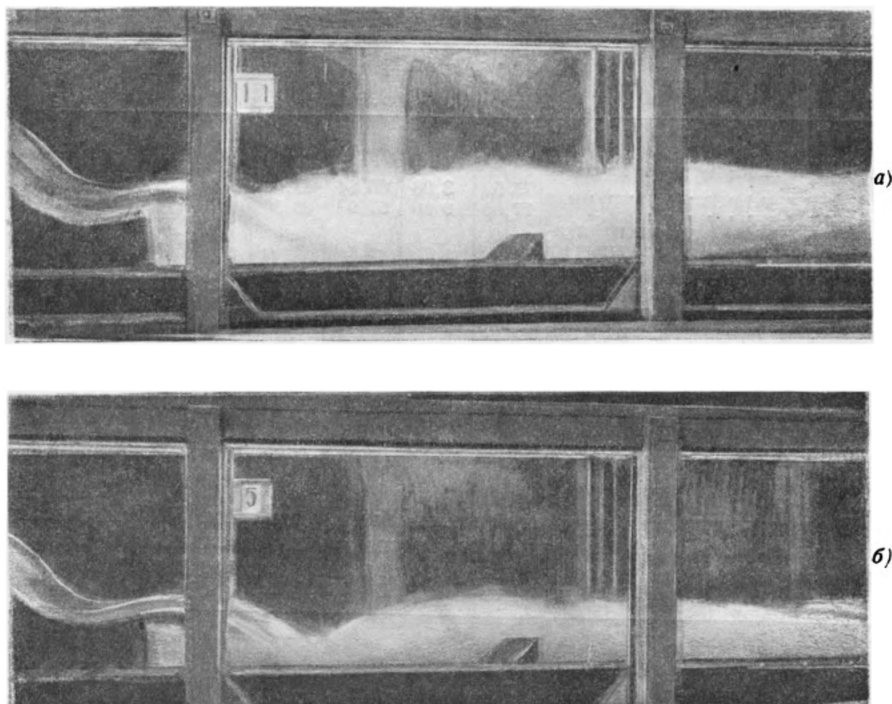


Фиг. 31. Плоская модель бетонной плотины № 11. Образование поверхностного вальца над трамплином при Г. Н. Б. = 75,00 *м*

фиг. 31 представлено затопление прыжка при Г. Н. Б. = 75,00; следует отметить, что хотя горизонт нижнего бьефа выше гребня водослива (74,0), однако даже при Г. Н. Б. = 80,0 *м* затопление не оказывает никакого влияния на коэфициенты расхода водослива. Незначительность влияния подтопления при указанных горизонтах нижнего бьефа можно объяснить тем, что горизонт нижнего бьефа устанавливается непосредственно за водосливом несколько ниже в связи с образованием здесь поверхностного вальца с обратным поверхностным течением. Это

уменьшает величину подтопления, фактически влияющего на перелив воды через гребень водослива.

При горизонтах нижнего бьефа от 69,5 до 72,50 *м* на водобое образуется донный режим (Г. Н. Б. = 69,50), характеризуемый погружением струи, сходящей с трамплина, к дну водобоя и образованием над ней интенсивного поверхностного вальца (фиг. 32, *а*). В этом случае под струей, сходящей с трамплина, создается интенсивный донный валец с пониженным давлением; в том же случае, когда Г. Н. Б. = 75,5 и Г. Н. Б. = 65,0 *м*, под струей наблюдается воздушное пространство (фиг. 32, *б*).



Фиг. 32. Плоская модель бетонной плотины № 11. Донный режим на водобое:

а — Г. Н. Б. = 69,50 *м* и Г. В. Б. = 80,00 *м* — под струей интенсивный донный валец с пониженным давлением; *б* — Г. В. Б. = 75,5 *м* и Г. Н. Б. = 65,5 *м* — под струей воздушное пространство

2. Донные скорости по длине потока (фиг. 33) возрастают постепенно и на расстоянии 48,0 *м* от конца водобоя достигают величины, соответствующей бытовому режиму потока. Наличие за пирсами отрицательных скоростей (до —0,77 *м/сек*) указывает на образование донного вальца.

Устройство за последним рядом пирсов каменной рисбермы с установкой в конце ее предохранительного плота («гребенки») улучшает условия гашения энергии, локализуя сферу размыва за рисбермой. Опыты, проведенные с устройством подобной системы, показали, что каменная рисберма[1], несмотря на большие скорости, не поддается размыву. Устойчивость рисбермы в этом случае объясняется тем, что обратные скорости за пирсами относительно невелики, и потому интенсивность завихрений за пирсами относительно слаба.

Установкой плота в конце рисбермы (фиг. 34) объем и глубины размывов за рисбермой были сведены до возможного минимума, причем, начиная от сквоз-

[1] Крупности камней моделировались по линейному закону.

а) Донные скорости V м/сек

Расстояние от конца водобоя l м

Условные обозначения

- - - - При варианте разработанном лабораторией без учета подпора от нижерасположенной плотины

——— То-же, при варианте с учетом подпора от нижерасположенной плотины

Фиг. 33. Результаты исследования режима нижнего бьефа бетонной плотины № 11 на плоской модели (при размываемом русле) при Г. В. Б. = =80,00 *м*; Г. Н. Б=69,50 *м* (все величины, полученные на модели 1:30, пересчитаны на натуру по закону Фруда): *а* — график распределения донных скоростей по длине потока; *б* — профили размывов песчаного русла

ной части плота, размыв получил настолько пологое и устойчивое очертание, что опасность подмыва была совершенно ликвидирована.

К концу опыта, продолжавшегося 35 мин., песок под нижней сквозной частью плота («гребенки») находился в спокойном состоянии, и лишь изредка отдельные песчинки перекатывались на небольшие расстояния, преимущественно в сторону верхнего бьефа. Таким образом установка предохранительного плота является вполне целесообразной.

3. Пропуск льда [1] через сооружение при принятой конструкции водобоя и носка плотины осуществляется вполне удовлетворительно при всех случаях эксплоатации кроме пятого (табл. 10), в котором при малых горизонтах (69,50 — 72,50 *м*) на водобое неизбежно возникает донный режим. Так как сброс льда в этом случае маловероятен, то в схеме эксплоатации необходимо избегать случаев, при которых возможен сброс льда в открытые полностью пролеты при горизонтах нижнего бьефа, меньших 72,50 *м*.

б) Сопряжение бьефов и гашение энергии, примененные на водопропускных пролетах бетонной плотины № 11

При исследовании сопряжения бьефов и гашения энергии для водопропускных пролетов плотины № 11 были положены в основу случаи эксплоатации, указанные в табл. 11.

Таблица 11

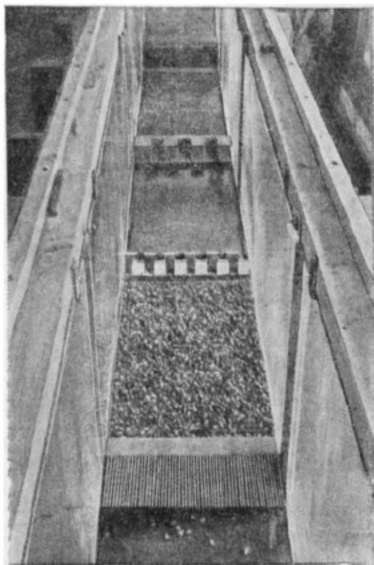
Случаи эксплоатации	Отметка горизонта верхнего бьефа	Открытие затворов по всей плотине	Открытие затворов в исследуемом пролете	Суммарный расход Q в $м^3/сек$	Отметка Г. Н. Б. в *м*
1	75,50	Открыты полностью 4 затвора в водосливных пролетах и 1 затвор в водопропускном пролете	Верхний затвор открыт, нижний закрыт	300	64.20
2	77,00	То же	То же	950	66,80
3	78,00	»	»	1 500	68,50
4	79,00	»	»	2 200	70,10
5	80,00	Открыты полностью 4 затвора в водосливном пролете и 1 верхний затвор; 3 затвора в водопропускных пролетах открыты на 1,0 *м*	»	3 400	71,80
6	80,00	Открыты на 1,0 *м* 4 затвора в водосливной части и 1 затвор в водопропускном пролете	Верхний затвор поднят на 1,0 *м*, нижний закрыт	700	66,00
7	80,00	Открыты полностью верхние затворы во всех пролетах; 1 нижний — на 1,0 *м*	Верхний затвор поднят полностью, нижний— на 1,0 *м*	4 800	74.90
8	80,00	Открыты полностью все верхние затворы; 3 нижних—на 1,0 *м* и 1—на 2,50 *м*	Верхний затвор поднят полностью, нижний— на 2,5 *м*	5 450	74,90
9	80,00	Открыты полностью все верхние затворы; 3 нижних—на 2,5 *м* и 1 нижний—на 4,0 *м*	Верхний затвор поднят полностью, нижний— на 4,0 *м*	6 280	75,70
10	80,00	Открыты полностью все верхние затворы и 1 нижний; 3 нижних—на 4,0 *м*	Верхний и нижний затворы открыты полностью	7 300	76,10

[1] Отдельные льдинки воспроизводились из парафина.

При подборе окончательной схемы гасителей были предварительно разработаны и испытаны три варианта гасителей и переходного участка водобоя с отм. 62,50 на отм. 61,50 *м* (фиг. 35).

Первые два варианта отличались друг от друга только формой основных зубчатых порогов, причем переход дна водобоя с отм. 62,50 на отм. 61,50 *м* достигался уступом, связанным с устройством зубчатых порогов. В третьем же варианте вместо зубчатого порога были опробованы пирсы той же высоты (2,0 *м*) совместно с наклонным переходным участком нижней части водобоя.

По примеру ранее описанных исследований для сравнительной оценки указанных вариантов лабораторией намечалось произвести опыты с размывами песчаного русла, устроенного за водобоем. Однако первые же опыты с размывами показали, что в данном случае такой метод испытаний неприемлем вследствие растекания потока в лотке после выхода из суженного пролета и сильного влияния стеклянных стенок лотка на распределение скоростей в плане за гасителями.



Фиг. 34. Общий вид плоской модели бетонной плотины № 11 при наличии каменной рисбермы и предохранительного плота («гребенки»).

При продолжительности опыта в 30 мин. почти во всех случаях эксплоатации около стеклянных стенок лотка за флютбетом наблюдались глубокие вымоины, в то время как в средней части лотка вследствие интенсивного набрасывания песка поперечными донными токами (с обеих сторон) обнаруживались лишь очень слабые пологие размывы, а иногда (например в шестом случае эксплоатации) даже намывы. Поэтому для выбора системы гасителей при опытах в условиях плоской задачи ограничивались только методом измерения донных скоростей по оси потока при наличии жесткого русла.

Результаты сравнительных испытаний были обработаны в виде эпюр распределения донных скоростей за водобоем. Сравнивая эти эпюры между собой, можно притти к заключению, что между испытанными вариантами существенных и резких различий не наблюдается. Во всех исследованных случаях эксплоатации и при всех трех вариантах за водобоем на протяжении 6,0—10,0 *м* ниже малого порога (фиг. 35) наблюдались образование донных завихрений с обратными скоростями, достигающими до 1,5 — 1,80 *м/сек*. Далее донные отрицательные скорости переходили в положительные и постепенно достигали нормальных.

В результате сравнения данных, полученных при испытании всех трех вариантов, лучшим был признан первый вариант, который и был принят за основу при разработке окончательного решения. Окончательно принятое решение (фиг. 35) отличалось от первого варианта только высотой нижнего сплошного порожка, которая с целью уменьшения донных завихрений была понижена на 0,25 *м* и принята равной 0,75 *м*.

Результаты исследований, произведенных с гасителями, устроенными по окончательной схеме (фиг. 35), показали, что в зоне донного завихрения, прилегающей к водобою, обратные донные скорости нигде не превосходили 1,40 *м/сек*, а в пятом и шестом случаях эксплоатации (табл. 11) достигали лишь 1,17 *м/сек*. В ближайших к водобою измерительных створах максимальные скорости находились в поверхностных и средних слоях потока, что доказывает правильную работу гасителей. В дальнейшем наблюдался постепенный переход к нормальному распределению скоростей, каковое при наличии гладкого русла в лотке характе-

ризовалось значительным возрастанием донных скоростей, вследствие чего отношение $\frac{v_{дон}}{v_{пов}}$ увеличивалось до 0,85 — 0,90 и выше.

Чтобы уменьшить или избежать ударов льда о водобой при падении льда вместе с переливающейся струей, чего следует ожидать при пропуске льда через водопропускной пролет в первых трех случаях эксплоатации, лаборатория рекомендовала предусмотреть для пропуска льда одновременное открытие затворов в трех-четырех водопропускных пролетах с целью повышения горизонта воды нижнего бьефа до отм. 68,50 — 69,0 *м*, при которых удары льдин о водобой, судя по опытным данным, были незначительными и случайными.

Как общий вывод можно отметить, что подобранные опытным путем размеры водобоя (длина 51,0 *м*), типы и размеры гасителей энергии, указанные выше, обеспечивают удовлетворительное перераспределение скоростей за водобоем, уменьшая донные скорости в пределах каменной рисбермы до безопасных величин.

Система гасителей кинетической энергии, подобранная по опытам в плоском лотке для водосливного и водопропускного пролетов плотины № 11, была подвергнута вторичному исследованию на пространственной модели узла сооружения в масштабе 1 : 80 натуральной величины.

При этом работа сооружений была исследована при следующих наиболее невыгодных схемах эксплоатации (табл. 12).

Фиг. 35. Продольный разрез по оси водопропускного пролета бетонной плотины № 11 по варианту лаборатории. Крепление нижнего бьефа (водосливная кривая *А — Б* построена по уравнению $y = 0{,}046\ x^2$)

Таблица 12

№ схемы	Схема эксплоатации	Горизонт верхнего бьефа в *м*	Горизонт нижнего бьефа в *м*	Суммарный расход в $м^3/сек$
3	5 верхних затворов (№ 4—8) открыты на 1,0 *м*; все остальные затворы закрыты	80,0	66,10	755,0
4	Затвор № 5 открыт полностью, остальные 7 верхних затворов открыты на 1,0 *м*; нижние затворы закрыты	80,0	69,50	1 945,0
5	5 верхних затворов (№ 4—8) открыты полностью, остальные 3 (№ 1—3) открыты на 1,0 *м*; нижние затворы закрыты	80,0	72,35	3 420,0
7	8 верхних и 1 нижний (№ 4) затворы открыты полностью; остальные нижние затворы (№ 1, 2 и 3) открыты на 2,5 *м* каждый	80,0	75,70	6 200,0

Приводим результаты этих исследований.

в) Проверка решений, полученных для плотины № 11 на пространственной модели узла, и окончательно принятое решение

Опыты по исследованию [1] условий гашения кинетической энергии потока при пространственном решении задачи производились первоначально на жесткой модели, где глубинные скорости изучались на рисберме и в нескольких расположенных ниже последней измерительных створах (фиг. 36).

На основании анализа скоростей, замеренных на жесткой модели, были сделаны соответствующие выводы в отношении эффективности работы исследованных схем водобоя и гасителей энергии, которые затем были проверены качественно на опытах с размываемым руслом.

Всего было проведено три цикла исследований.

Первые два цикла опытов проводились на жесткой модели (проектный вариант, основанный на опытах в плоском лотке, и ряд новых лабораторных схем водобоя).

В третий цикл вошли опыты с размываемым руслом модели; эти опыты (наблюдения за размывом рисбермы при неукрепленном дне за водобоем) позволили произвести наглядное сравнение и качественно оценить работу гасителей, исследованных в первых циклах опытов, в различных случаях эксплоатации.

Первый цикл опытов заключал в себе проверку выбранных типов гасителей в условиях пространственной задачи, воспроизводящей в целом работу исследуемого сооружения, а также установление длины и типа рисбермы.

Для сравнения данных, полученных на пространственной модели, с данными, полученными ранее на плоской модели, все замеры производились в одноименных точках на створах, расположенных на расстояниях, принятых при исследованиях в плоском лотке.

Результаты наблюдений, произведенных в этом цикле опытов (фиг. 37 — 38), привели к следующему выводу. Наибол е неблагоприятным в смысле гашения энергии потока в нижнем бьефе плотины оказался седьмой случай эксплоатации, предусматривающий сброс максимального расхода $Q = 6\,200$ $м^3/сек$ при Г. Н. Б. $= 75{,}70$ *м*. В этом случае наибольшие скорости за водобоем были зарегистрированы против водопропускного пролета № 4 (фиг. 36 и 40) со щитами, открытыми на полную высоту в верхнем и нижнем отверстиях.

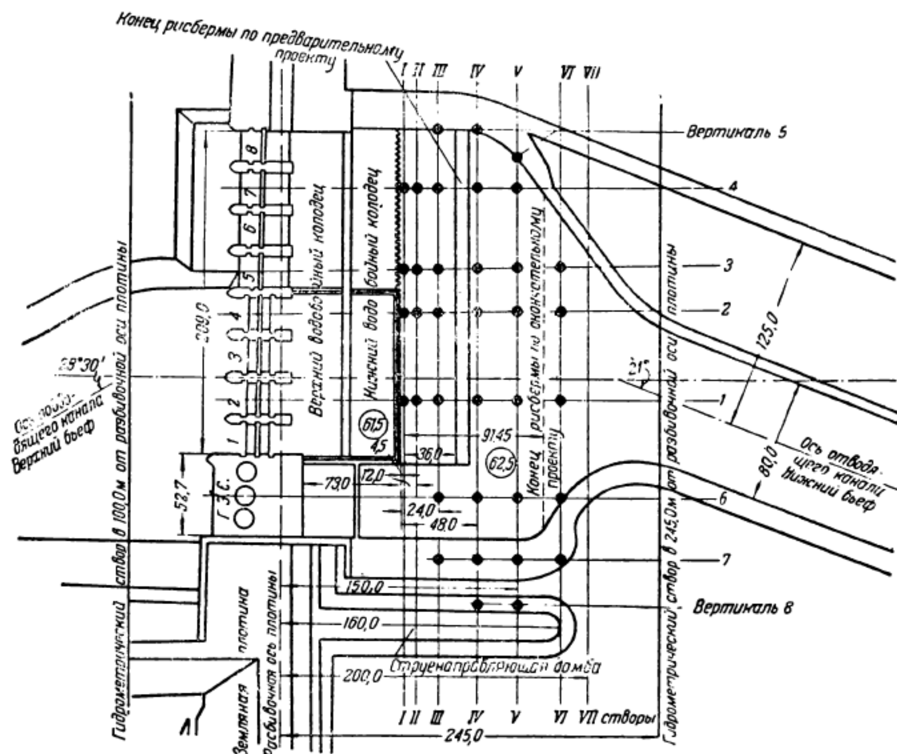
Наибольший интерес с точки зрения размыва дна за водобоем представляют донные скорости, замеренные (по условиям возможности замера) на высоте 0,5 *м* от дна. Картина распределения донных скоростей вдоль по рисберме (как в рассматриваемом седьмом случае, так и в других), представленная на фиг. 38, позволила установить, что величина донных скоростей против четвертого отверстия

[1] Руководитель опытов инж. А. И. Козловский.

колеблется (седьмой случай эксплоатации) за водобоем от 3,0 до 4,25 *м/сек* на расстоянии 48 *м* от нижнего водобойного порога; ниже наблюдается постепенное уменьшение донных скоростей, которые на расстоянии 107 *м* от водобоя падают до 2,96 *м/сек*.

Эти величины донных скоростей по сравнению с соответствующими скоростями, полученными в плоской модели, значительно превосходят последние. Так например, в начале рисбермы разница между ними достигает 70%, на последующих створах расходимость постепенно убывает, но все же остается высокой и в 48 *м* от водобоя измеряется 19%; скорости, замеренные на глубине 0,6 *h* от поверхности, оказались меньше на 7 — 14% скоростей, замеренных на плоской модели.

Специальными опытами было установлено, что столь большое расхождение в величинах, полученных на пространственной и плоской моделях, объясняется

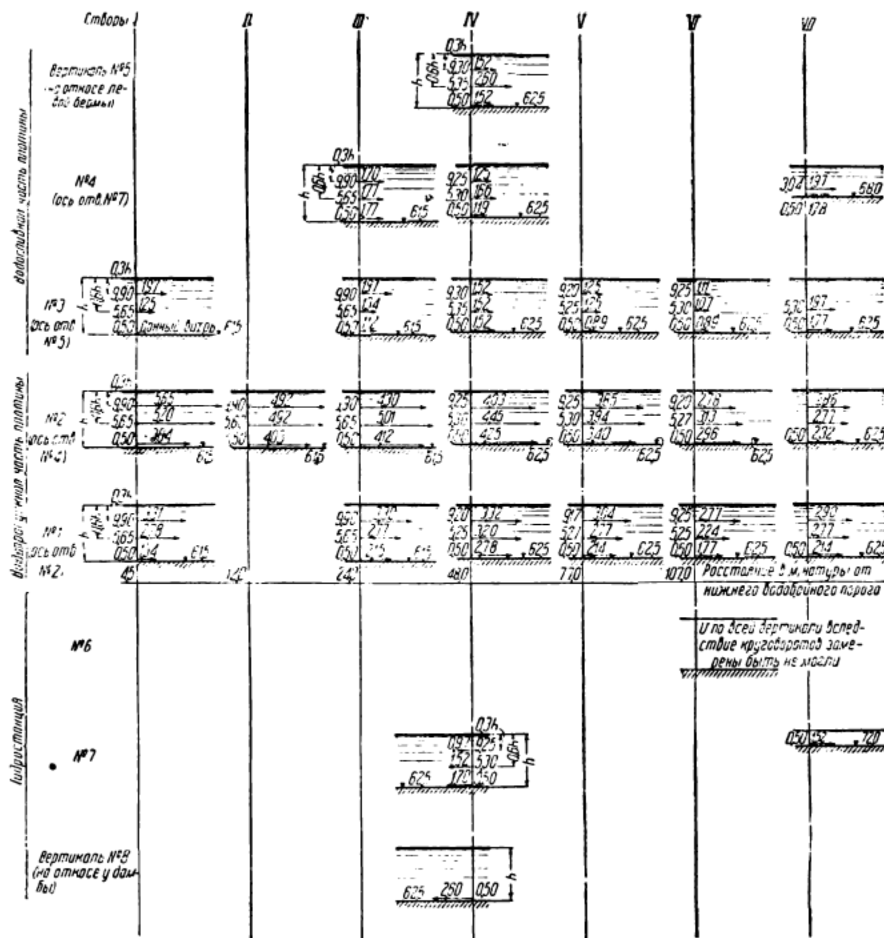


Фиг. 36. План нижнего бьефа бетонной плотины № 11 с показанием измерительных створов и вертикалей

наличием влияния и непосредственной близости двух неодинаковых гидравлических режимов на водобое у смежных отверстий: водопропускном № 4 и водосливном № 5 (фиг. 40). Разобщение этих режимов жесткой стенкой улучшило условия растекания потока против отверстия № 4, благодаря чему скорости на рисберме уменьшились и по величине приблизились к тем, которые были получены при испытании модели в плоском лотке, где два указанных режима не могли быть одновременно воспроизведены.

Значительные скорости на рисберме, достигавшие 2,8 *м/сек*, были замерены также и по оси пролета № 2 с донным отверстием, открытым на 2,5 *м*. Против водосливных отверстий донные скорости на рисберме в этом случае не превосходили 1,50 — 1,80 *м/сек*.

Не приводя описания результатов опытов, полученных при иных схемах эксплоатации (видных на приводимых графиках фиг. 38), отметим, что указанное выше взаимное влияние соприкасания двух совершенно различных гидравлических режимов на распределение и величину скоростей обнаружилось и в остальных случаях эксплоатации.

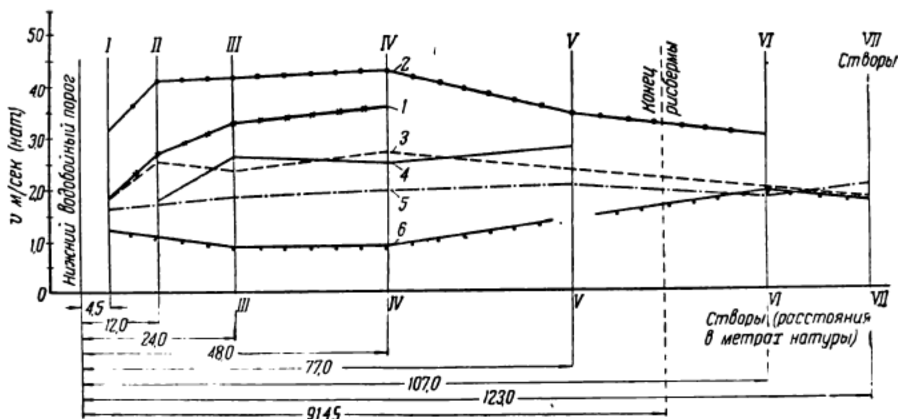


Фиг. 37. Результаты исследования режима нижнего бьефа бетонной плотины № 11 на жесткой пространственной модели при пропуске через сооружение $Q = 6\,200$ *м³/сек* при Г. В. Б. = 80,00 и Г. Н. Б. = 75,70. Седьмой случай эксплоатации — 8 верхних щитов и один нижний (№ 4) открыты полностью, остальные три нижних щита (№ 1, 2, 3) открыты на 2,5 *м*

Считая скорости, полученные против отверстия № 4, высокими для запроектированного типа рисбермы (на первых 40 *м* ряжевое крепление, на последующих 50 *м* — фашинный тюфяк, пригруженный слоем камня), лаборатория предприняла ряд исследований по изысканию мероприятий, снижающих величину скоростей до пределов, безопасных в отношении размывов как на самой рисберме (каменная пригрузка фашинного тюфяка, укрепленная двойной мостовой), так и непосредственно за последней.

Не касаясь промежуточных вариантов, опробованных лабораторией (более 20 схем), остановимся лишь на рассмотрении окончательной схемы, принятой к осуществлению в проекте.

В результате всех опытов с подбором раздельной стенки и водобойных порогов лаборатория остановилась на решении, которое дополняло проектную

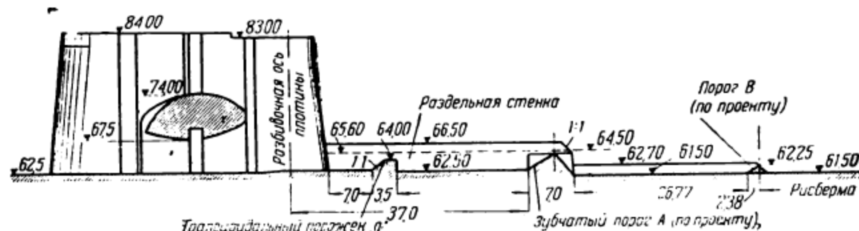


Фиг. 38. График изменения придонных скоростей по длине рисбермы бетонной плотины № 11 против отверстий, имеющих наибольшее открытие щитов (придонные скорости замерены на высоте 0,5 *м* от дна):

1 — кривая изменения скоростей по опытам в плоской задаче, замеренных по высоте 0,27 *м* от дна для 7-го (10-го) случая эксплоатации; *2* — 7-й случай эксплоатации, ось отверстия № 4; *3* — 4-й случай, ось № 4; *4* — 4-й случай, ось № 5; *5* — 5-й случай, ось № 5; *6* — 3-й случай, ось № 4

схему водобоя трапецоидальным порожком *а* высотой 1,5 *м*, установленным в 7 *м* от низовой линии бычков, и устройством раздельной стенки между пролетами № 4 и 5 до отм. 66,5 *м* (фиг. 39).

Эта схема водобоя была исследована дополнительно на пространственной модели с размываемым руслом (третий цикл опытов).



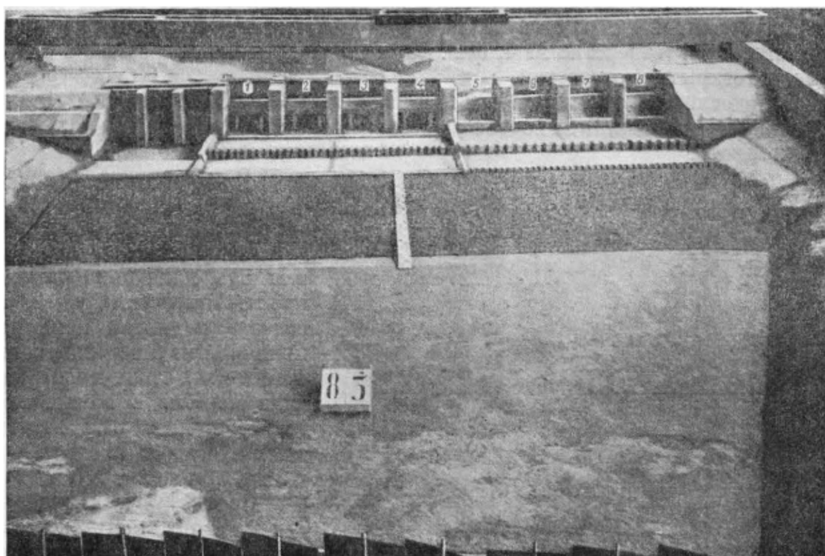
Фиг. 39. Окончательная схема водобоя водопропускных пролетов бетонной плотины № 11 (по опытам на пространственной модели в масштабе 1 : 80)

В опытах с размывом дна за водобоем надлежало проверить с качественной стороны условия работы рисбермы и установить рациональную длину ее с точки зрения безопасности рисбермы от подмыва со стороны нижнего бьефа. Одновременно с этим настоящие опыты дали возможность произвести весьма наглядное сравнение эффективности работы гасителей кинетической энергии потока, исследованных ранее на жесткой модели.

Для опытов рисберма была отсыпана на всей длине из гальки диаметром 0,5 — 0,7 *см* (0,40 — 0,56 *м* в натуре); дно канала за рисбермой было сделано из песка фракции 0,7 *мм* и мельче.

Общий вид переустроенной модели приведен на фиг. 40.

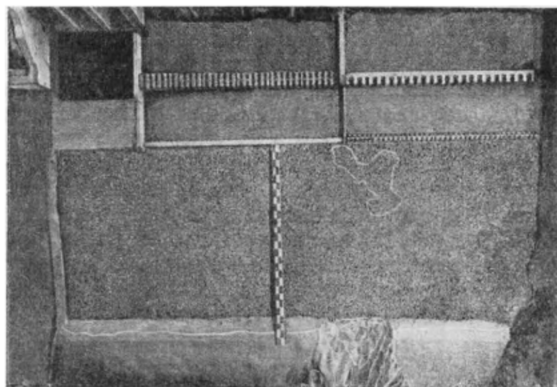
Наблюдения за размывом рисбермы и дна отводящего канала были произведены для двух расходов: $Q_1 = 6\,200$ *м³/сек* и $Q_2 = 1\,945$ *м³/сек*, которые в опы-



Фиг. 40. Общий вид размываемой пространственной модели бетонной плотины № 11 (масштаб 1 : 80)

тах с жесткой моделью при принятой схеме эксплоатации плотины (схемы 7 и 4, см. табл. 12) выявились как наиболее невыгодные в смысле гашения кинетической энергии потока и распределения скоростей в нижнем бьефе.

Здесь исследовались три варианта рисбермы, отличавшиеся друг от друга длиной: $L = 91{,}45$ *м* (по проекту), $L = 35{,}0$ *м* и $L = 50{,}0$ *м*. В последних двух случаях конечная часть рисбермы закреплялась в опытах жестко, и картина размыва дна за рисбермой изучалась: а) без предохранительного плота («гребенки») и б) с плотом, установленным в конце рисбермы.



Фиг. 41. Максимальный размыв дна за водобоем пространственной модели бетонной плотины № 11 (полностью открыто донное отверстие № 4)

Произведенные опыты с размывами показали следующее:

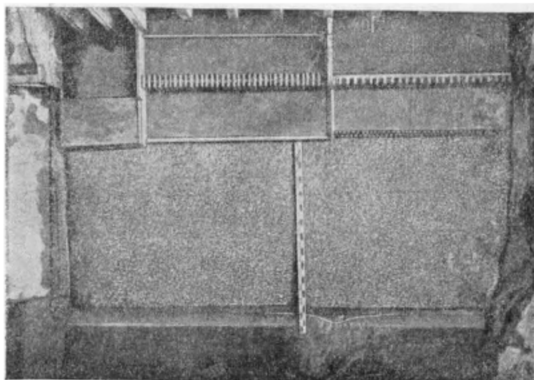
1. При пропуске через сооружение $Q = 6\,200$ *м³/сек* в случае устройства гасителей и рисбермы по проекту ($L = 91{,}45$ *м*) наибольший размыв дна за водобоем следует ожидать против водопропускных отверстий. В этом случае на модели против указанной части плотины размыло не только песчаное дно за рисбермой,

но и гальку $d = 0{,}5 \div 0{,}7$ *см*, уложенную в пределах рисбермы; при этом максимальный размыв был получен в случае полного открытия донного отверстия № 4 (фиг. 41).

Устройство рекомендованного и принятого в окончательной схеме трапецоидального порожка, устанавливаемого на расстоянии 7 *м* от линии бычков, значительно уменьшило размыв за водобоем при полном открытии одного из донных отверстий (отверстие № 4, фиг. 40) и вовсе прекратило размыв в случае частичного открытия отверстий.

2. В водосливной части плотины при расходе $Q = 6\,200$ *м³/сек* и Г. Н. Б. = =75,7 *м* никакого размыва за водобоем (независимо от длины рисбермы на модели) не наблюдалось.

3. Сокращение рисбермы до 50,0 *м* и затем до 35,0 *м* в случае пропуска $Q = 6\,200$ *м³/сек* значительно увеличило в опытах размыв песчаного дна за рисбермой против водопропускной части: увеличились площадь и глубина размыва против отверстия № 4 и образовалась новая зона размыва против отверстия, соседнего с ГЭС. Полученная картина размыва в полной мере согласуется с результатами замера донных скоростей на жесткой модели.



Фиг. 42. Размыв дна за водобоем при установленном трапецоидальном порожке (полностью открыто отверстие № 5)

Против водосливной части плотины, как уже отмечалось в п. 2, никакого размыва песчаного дна и в этом случае на модели не наблюдалось.

4. Опыты показали, что длина рисбермы, запроектированная на первых 35 *м* от водобоя ряжевой конструкции, должна быть удлинена на 90 *м*, предусмотренных проектом к креплению; в конце ряжевой рисбермы следует установить предохранительный плот («гребенку»). Действие этого плота, как показали опыты, представляется весьма эффективным: во всех случаях установки плота устойчиво предохранялся от размыва прикрытый «гребенкой» участок песчаного дна, примыкающий непосредственно к рисберме; кроме того сам размыв песчаного дна за «гребенкой» происходил в этом случае с более пологим устойчивым откосом (не круче 1 : 4 — 1 : 5), который сохранялся независимо от продолжительности размыва (фиг. 43).

5. Влияние шероховатости рисбермы на гашение скоростей в придонных слоях неоспоримо подтверждается опытами: замеренные скорости на высоте 0,5 *м* (0,6 *см* на модели) от дна в пределах первых 50 *м* от водобоя оказались при отсыпи рисбермы из гальки в 1,5 — 3 раза меньше тех, которые были получены на жесткой модели с гладким дном.

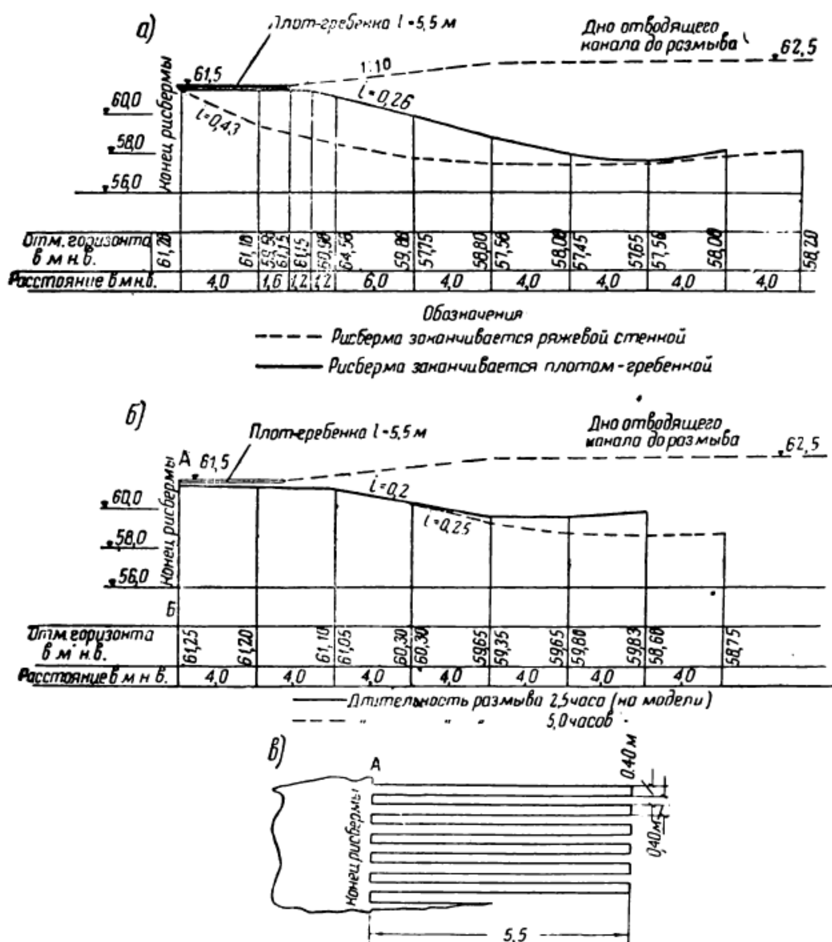
г) Гашение кинетической энергии потока в нижнем бьефе водосброса земляной плотины № 3[1]

Характерной особенностью гашения энергии в нижнем бьефе водосброса плотины № 3 является наличие крайне неодинакового по фронту распределения расхода (фиг. 44). Равномерный перелив воды через гребень водослива резко нарушается мощными потоками воды, вытекающими из донных отверстий, располо-

[1] Исследования проведены под руководством инж. Н. А. Ржаницына.

женных в крайних полупролетах водосброса. Это обстоятельство, нарушая режим потока в нижнем бьефе, ставит перед гасителями ряд дополнительных условий.

Поэтому при отыскании наилучшего в гидравлическом отношении решения гашения кинетической энергии потока в нижнем бьефе надлежало разрешить

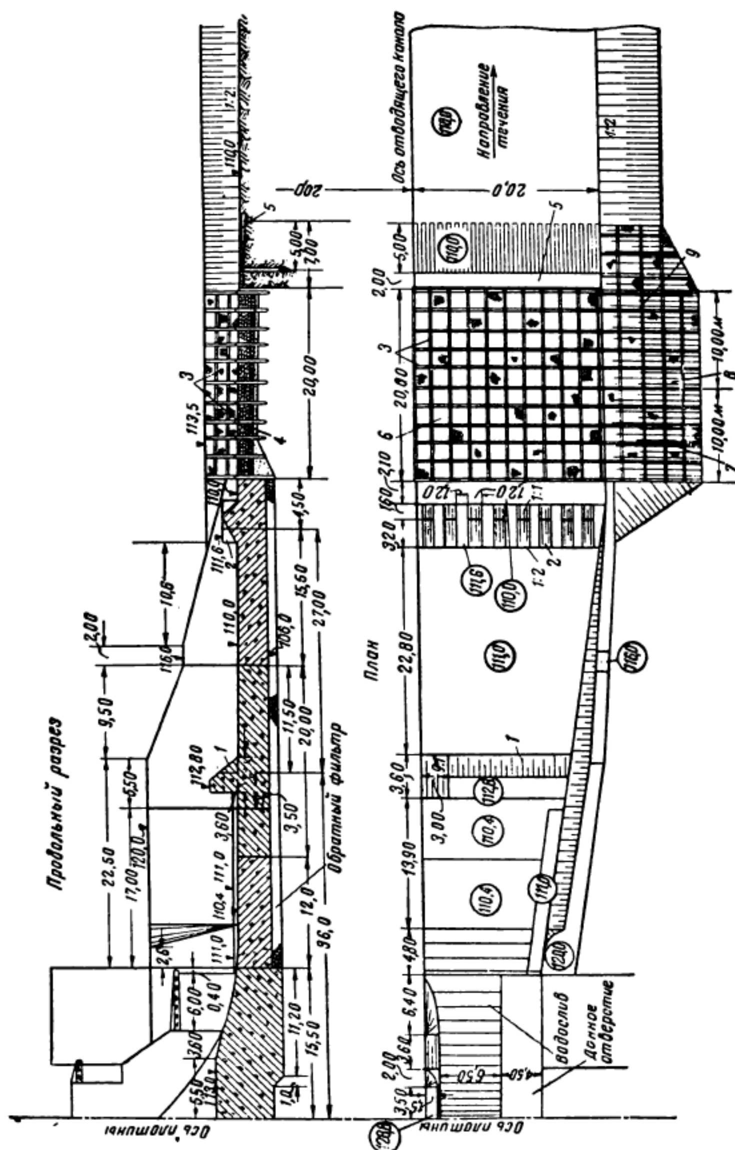


Фиг. 43. Действие предохранительного плота («гребенки»), установленного в конце рисбермы бетонной плотины № 11, по данным опытов на пространственной модели в масштабе 1 : 80:

а — профили размыва песчаного русла за рисбермой по оси 5-го отверстия. $Q = 1\,945$ *м³/сек*; Г. В. Б. = 80,00; Г. Н. Б. = 69,50; рисберма $L = 50{,}0$ *м*. Песчаное русло $L = 139{,}50$ *м*. Затвор № 5 открыт полностью; затворы № 1 — 4 (верхние) и № 6 — на 1,0 *м*. Длительность размыва 2,5 часа (на модели); *б* — профили размыва песчаного грунта за рисбермой по оси 4-го отверстия. $Q = 6\,200$ *м³/сек*; Г. В. Б. = 80,0; Г. Н. Б. = 75.70; рисберма $L = 50{,}0$ *м*. Песчаное русло $L_1 = 139{,}50$ *м*. Все верхние затворы открыты полностью; затворы № 1, 2 и 3 открыты на 2,5 *м*. Рисберма заканчивается плотом-гребенкой; *в* — план плота-гребенки.

два основных вопроса: во-первых, с помощью подобранной системы гасителей надо было добиться равномерного распределения сбрасываемого через сооружение расхода воды по всей ширине подводящего канала и, во-вторых, следовало погасить кинетическую энергию потока до величин, допускаемых конструкцией предполагаемого крепления отводящего канала в нижнем бьефе.

С помощью гасителей энергии обычных типов эти два условия, как показали опыты, вполне могли быть выполнены. Однако для этого требовалась постановка чрезвычайно мощного гасителя в виде порога сложной конструкции с высотой порядка 4 — 4,5 *м*. Это решение, полученное при первом цикле исследований,



Фиг. 44. Схема бетонного водосброса-водоспуска земляной плотины № 3:

1 — порог № 1; *2* — порог № 2; *3* — плетневые клетки (камень крупностью 0,2 — 0,3 *м*); *4* — двойная мостовая; *5* — предохранительный плот; *6* — риберма; *7* — камень крупностью около 0,4 *м*; *8* — камень крупностью 0,2 — 0,3 *м*; *9* — крепление откосов.

оказалось настолько неэкономичным, что опыты по подбору гасителей энергии были проведены вновь.

В результате дополнительных исследований было получено новое крайне простое и конструктивное решение, вполне заслуживающее более детального рассмотрения.

Общий вид полученного решения представлен на фиг. 45 (см. также фиг. 44) и заключается в следующем. В средней части водобоя устанавливается трапецоидальный порог высотой 2,4 *м*, имеющий в средней части просвет шириной 6,0 *м*. В конце водобоя в месте начала отводящего канала устанавливается зубчатый порог обычного типа высотой 1,6 *м*.

Устройство просвета в первом трапецоидальном пороге значительно улучшило условия перераспределения расходов и скоростей в плане за гасителями.

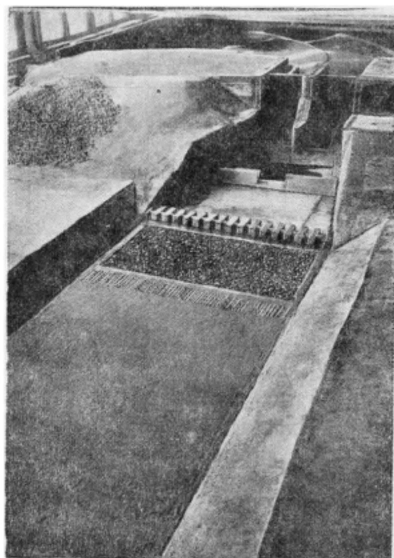
Результаты опытных замеров скоростей в плане и по вертикали, полученные на пространственной модели в масштабе 1 : 40, позволяют отметить следующее (фиг. 46):

1. При равномерной работе водосливных отверстий эпюра донных скоростей в плане имеет в средней части некоторый провал, который в дальнейшем быстро выравнивается. Это объясняется влиянием неравномерности в поступлении расходов воды через первый порог, имеющий в средней части просвет.

2. При работе всех отверстий (водосливных и донных) эпюры распределения донных скоростей в плане на четвертом створе и далее имеют достаточно равномерный характер. Скорости, не превышая величины 1,81 *м/сек*, изменяются в плане от 0,95 до 1,30 *м/сек*. Подобное распределение скоростей указывает, что работа гасителей в данном случае вполне удовлетворительная.

3. Даже при неравномерной работе отверстий (открыто одно водосливное отверстие) эпюра донных скоростей в плане в непосредственной близости от сооружения (на расстоянии 60 *м*) является достаточно правильной и равномерной.

4. Эпюры скоростей, замеренных по вертикалям, также подтверждают хорошую работу подобранной системы гасителей: от резко выраженного поверхностного режима во втором створе поток быстро выравнивается и уже в четвертом и пятом створах приближается к устойчивому равномерному потоку с характерными для него эпюрами скоростей по вертикали.



Фиг. 45. Общий вид модели водосброса плотины № 3. Вид со стороны нижнего бьефа

Небезынтересно привести некоторые данные о влиянии шероховатости рисбермы на величину донных скоростей (фиг. 47).

В опытах были замерены скорости при гладком русле и при каменной рисберме, сложенной из камней крупностью 0,20 —0,30 *м* (для натуры) [1].

Приведенные эпюры донных скоростей показывают, что при рисберме, выложенной из камня, скорости, сохраняя тот же характер распределения в плане, уменьшаются на величину порядка 15 — 30 *см/сек*. Таким образом влияние шероховатости рисбермы на величину донных скоростей подтверждается и в данном случае.

д) Гашение энергии в нижнем бьефе водосброса № 3 [2]

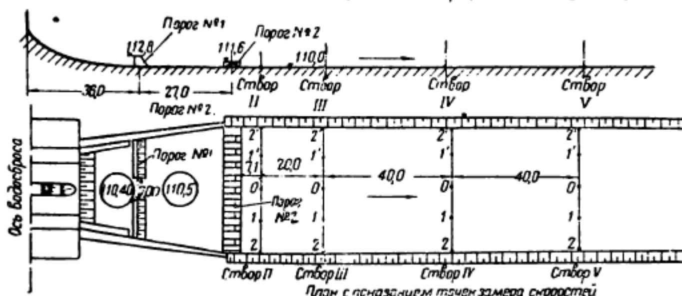
Большой практический и экспериментальный интерес представляют собой исследования, связанные с условиями сброса в канал воды пересекающей его реки. Эти исследования были проведены лабораторией в двух циклах: в первом

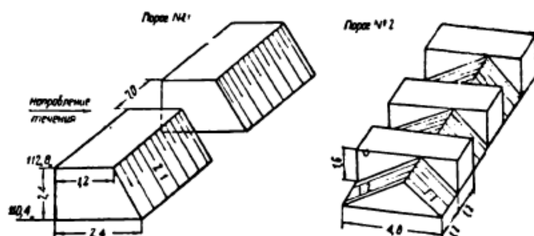
[1] Модельные размеры (для масштаба 1 : 40) определялись по линейному уменьшению крупности.

[2] Исследования проведены под руководством В. Ф. Тейтельмана.

Случаи эксплоатации	Створ II	Створ III	Створ IV	Створ V	
Случай 1	2' 0,89; 1' 0,93; 0 0,84; 1 0,89; 2 0,75	1,16; 1,22; 1,09; 1,26; 1,26	1,28; 1,25; 1,25; 1,22; 1,22	0,97; 1,14; 0,88	Эпюры донных скоростей (в плане)
Водосливные отверстия открыты полностью ГВБ - 127,60 ГНБ - 115,10 Расход воды Q=382,5 м³/сек	115,10; 0,2h; 0,6h 1,22; 110,00 0 0,84; 3,04	Вертикаль 0: 1,80; 1,40; 1,09	Вертикаль 0: 1,50; 1,47; 1,05	Вертикаль 0: 1,44; 1,35; 1,14	Эпюры скоростей по вертикалям по оси отводящего канала
Случай 2	2'; 1'; 0; 1; 2 Вихревое движение	1,16; 1,38; 1,23; 1,18; 1,16	1,06; 1,16; 1,20; 1,25; 1,02	0,85; 1,01; 0,84	Эпюры донных скоростей (в плане)
Водосливные отверст. открыты полностью ГВБ - 127,11 ГНБ - 114,90 Расход воды Q=320,8 м³/сек	114,90; 110,00	Вертикаль 0: 0,2h 1,82; 0,6h 1,43; h 1,23	Вертикаль 0: 1,44; 1,32; 1,20	Вертикаль 0: 1,35; 1,16; 1,01	Эпюры скоростей по вертикалям по оси отводящего канала
Случай 6	2'; 1'; 0; 1; 2 Вихревое движение	1,35; 1,32; 1,16; 1,02; 0,93	1,08; 1,22; 1,30; 1,18; 0,85	1,06; 1,23; 1,10	Эпюры донных скоростей (в плане)
Донные и водосливные отверстия открыты ГВБ - 124,9 ГНБ - 115,10 Расход воды Q=382,5 м³/сек	115,10; 110,00	Вертикаль 0: 0,2h 2,04; 0,6h 1,66; h 1,16	Вертикаль 0: 1,81; 1,75; 1,30	Вертикаль 0: 1,69; 1,53; 1,23	Эпюры скоростей по вертикалям по оси отводящего канала

Продольный профиль по оси канала



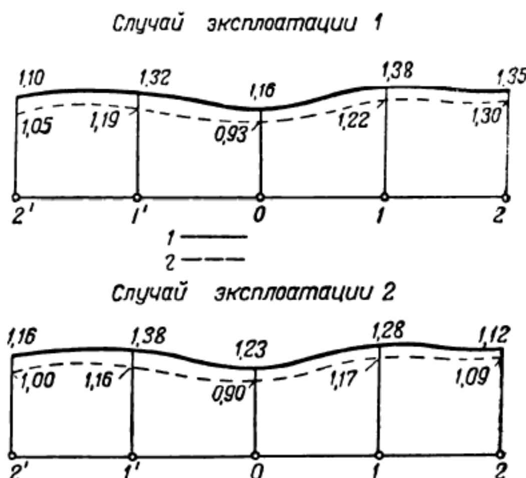


Фиг. 46. Схема гасителей энергии в нижнем бьефе водосброса плотины № 3 и эпюры распределения скоростей в нижнем бьефе при различных случаях эксплоатации по данным опытов на модели в масштабе 1 : 40 (скорости пересчитаны на натуру по закону Фруда и выражены в *м/сек*).

цикле был исследован вариант открытого сброса; во втором цикле — шахтного сброса. Поскольку вариант шахтного сброса был принят к осуществлению и построен, остановимся на рассмотрении только этого варианта.

Схема водосброса № 3 шахтного типа по первому (проектному) варианту представлена на фиг. 48.

В теле плотины располагаются две почти горизонтальные ($i = 0{,}045$) сбросные галлереи прямоугольного сечения, каждая площадью $4{,}50 \times 3{,}0$ *м* в начале и $7{,}90 \times 4{,}0$ *м* в выходном сечении. Входная часть галлерей закруглена кверху и имеет оголовок по типу шахтного водосброса; сечение в этой части на входе $3{,}0 \times 9{,}0$ *м*, постепенно уменьшаясь, доходит до $8{,}0 \times 9{,}0$ *м*. В узкой части входа располагаются два затвора с горизонтальной осью вращения, имеющие несимметричную форму (чечевицеобразную). Вращением этих затворов в противоположные стороны регулируется величина отверстия вплоть до полного открытия.



Фиг. 47. Исследование модели водосброса плотины № 3. Эпюры донных скоростей (в плане) в конце рисбермы (створ III) при различной ее шероховатости (расположение измерительных створов и точек, а также случаи эксплоатации указаны на фиг. 46):

1 — скорости в *м/сек* при гладком русле; *2* — то же при рисберме из камней крупностью 0,2 — 0,3 *м*

Исследования проводились на пространственной модели в масштабе 1 : 40 и в плоском лотке в более крупном масштабе (1 : 20).

При исследовании первоначальной схемы в плоском лотке оказалось, что пропуск максимального паводка $Q_{max} = 280$ *м³/сек* (Г. Н. Б. = 122,00) происходит при полностью открытых затворах, при незатопленном входном сечении водосброса и сопровождается сильной аэрацией потока (фиг. 49).

Опыты, произведенные с целью выработки мероприятий для уничтожения аэрации потока, привели к новому варианту, принятому далее в качестве окончательного. При этом были внесены в первый вариант следующие изменения:

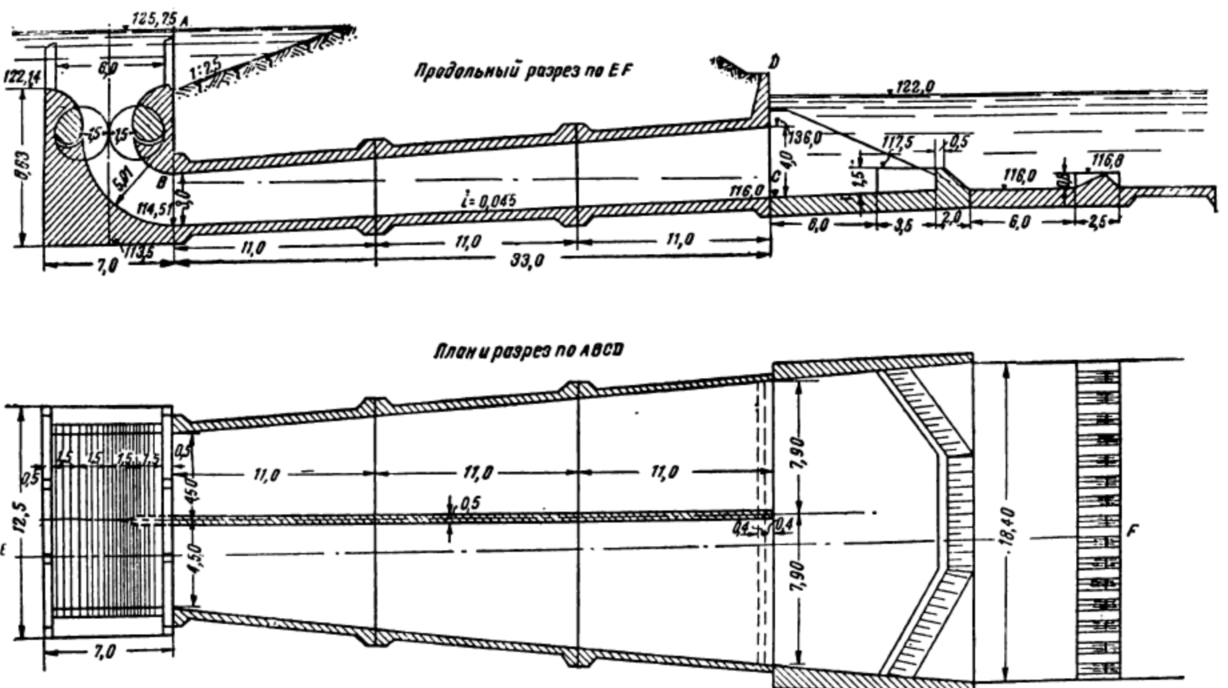
1) высота продольных галлерей в начальном сечении была уменьшена до 2,0 *м*, причем в этом сечении были установлены обычные плоские затворы;

2) в целях уменьшения входных (вертикальных) скоростей и засасывания воздуха входное сечение было расширено до 8 *м*;

3) для лучшего растекания потока в нижнем бьефе (в выходном отверстии) были установлены бычки, разделяющие каждую трубу на две части.

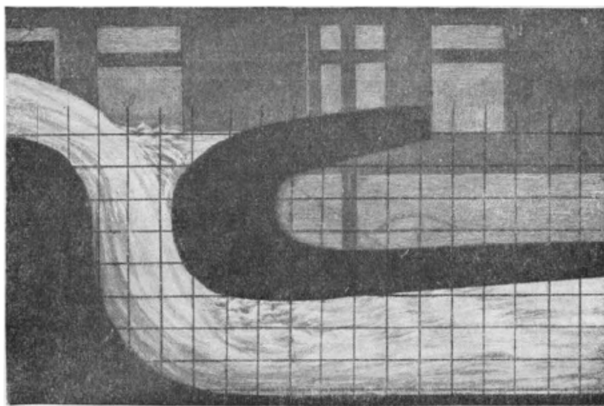
Следует отметить, что для полного устранения аэрации (засасывания воздуха) лабораторией предлагался вариант с горизонтальным подводом воды и устранением вертикальной входной воронки, требовавшей углубления дна верхнего бьефа до отм. 114,52 *м* в пределах подхода к сооружению. Однако этот вариант по экономическим соображениям принят не был.

Испытания первого варианта на гашение энергии в нижнем бьефе показали, что при пропуске максимальных летних паводков ($Q = 59{,}0$ *м³/сек*) во время навигационного периода гашение энергии происходит при плавном и равномерном растекании потока по всему сечению отводящего канала. Как показали специальные опыты по исследованию условий подхода судов к шлюзу, такое растекание является обязательным.



Фиг. 48. Схема шахтного водосброса № 3 по первому (проектному) варианту

Поэтому выходная часть водосброса и гаситель энергии в окончательном варианте были установлены следующие (фиг. 50):



Фиг. 49. Испытание плоской модели шахтного водосброса № 3 (первоначальная схема) при максимальном расходе и полностью открытых затворах.

1) сопряжение выходного оголовка с откосами отводящего канала было устроено в виде косых плоскостей;

2) с низовой стороны каждого промежуточного бычка (разделяющего каждую трубу на две части) были установлены направляющие стенки длиной 5,90 *м* под углом 22° к оси отводящего канала;

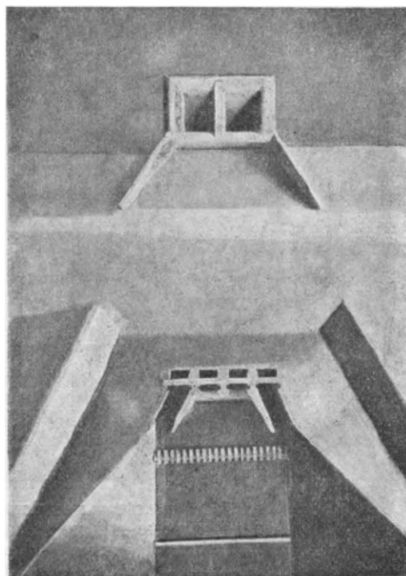
3) в выходном сечении отверстий были установлены прямоугольные зубчатые пороги высотой 1,50 *м* и сплошной порог высотой 0,6 *м*.

С помощью указанных мероприятий для максимального навигационного расхода $Q = 59{,}0$ $м^3/сек$ удалось достигнуть надлежащего гашения кинетической энергии и плавного и спокойного растекания потока по всему живому сечению отводящего канала (фиг. 51).

В случае пропуска того же расхода через одну трубу (ремонтный случай) растекание наблюдается только в соответствующей половине отводящего канала (фиг. 52).

Приведенные исследования показали, что подобранный гаситель энергии оказывает весьма благоприятное влияние на растекание потока (фиг. 51 и 52).

В табл. 13 приводятся значения поверхностных скоростей для сооружения в натуре, вычисленных по фотоснимкам светящихся поплавков.



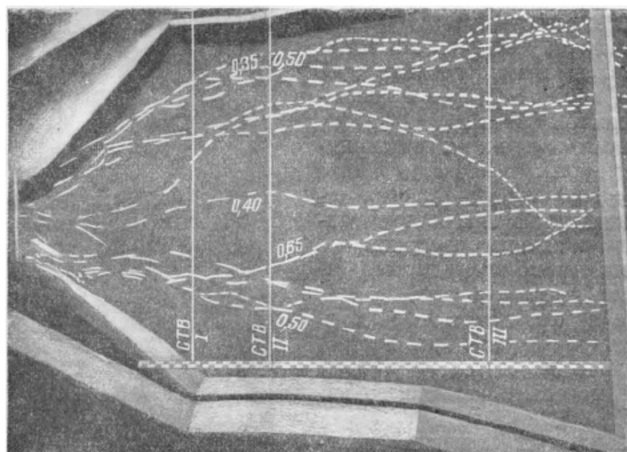
Фиг.50. Пространственная модель шахтного водосброса № 3 в масштабе 1 : 40 (окончательный вариант)

Из таблицы видно, что при пропуске летнего паводка $Q = 59$ $м^3/сек$ через обе галлереи распределение поверхностных скоростей получается весьма равно мерным, что особенно важно для судоходства.

Таблица 13

№ створов	Левая сторона		Ось	Правая сторона		Q в $м^3/сек$
	откос	средняя часть		откос	средняя часть	
	Величина поверхностных скоростей в *м/сек*					
I	— 0,60	1,00	0,70	0,65	0,85	180,0
II	0,50	0,85	—	1,30	1,50	
III	0,85	—	—	—	0,40	
I	0,75	0,80	0,85	0,75 ; 1,00	1,00	59
II	0,35 ; 0,50	—	0,40	0,50	0,65	
III	—	0,30	0,375	—	0,20	
I	—	1,50	3,70	—	2,00	80
II	1,75	1,50	—	1,75	1,50	
III	0,85	1,0	1,10	0,75	1,00	
I	0,53	1,05	1,10	0,80	1,20	59 (работает одна галлерея)
II	0,10	0,25	—	0,85	0,80	
III	—	0,12	—	0,90	—	
I	—	1,25	3,05	—	1,65	120
II	—	1,30	2,40	—	1,70	
III	1,00	—	1,70	0,63	—	

Что касается эпюр распределения скоростей по вертикалям, то таковые приводятся на фиг. 53 и также свидетельствуют об удовлетворительном гашении энергии и распределении скоростей потока.

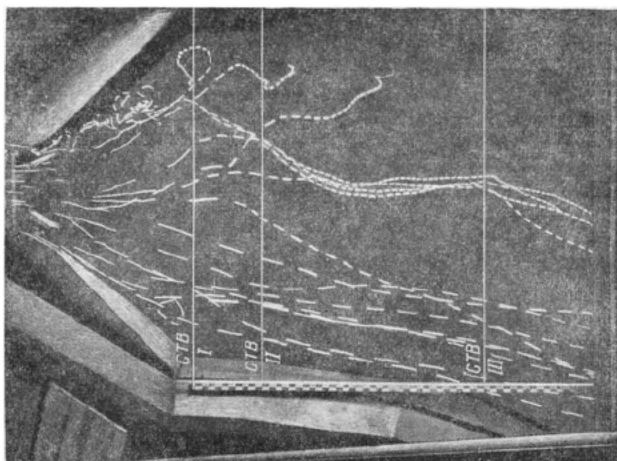


Фиг. 51. Результаты исследования шахтного водосброса № 3. Поверхностные линии течений с показанием величин поверхностных скоростей (*м/сек*). Расход воды $Q = 59{,}0$ $м^3/сек$

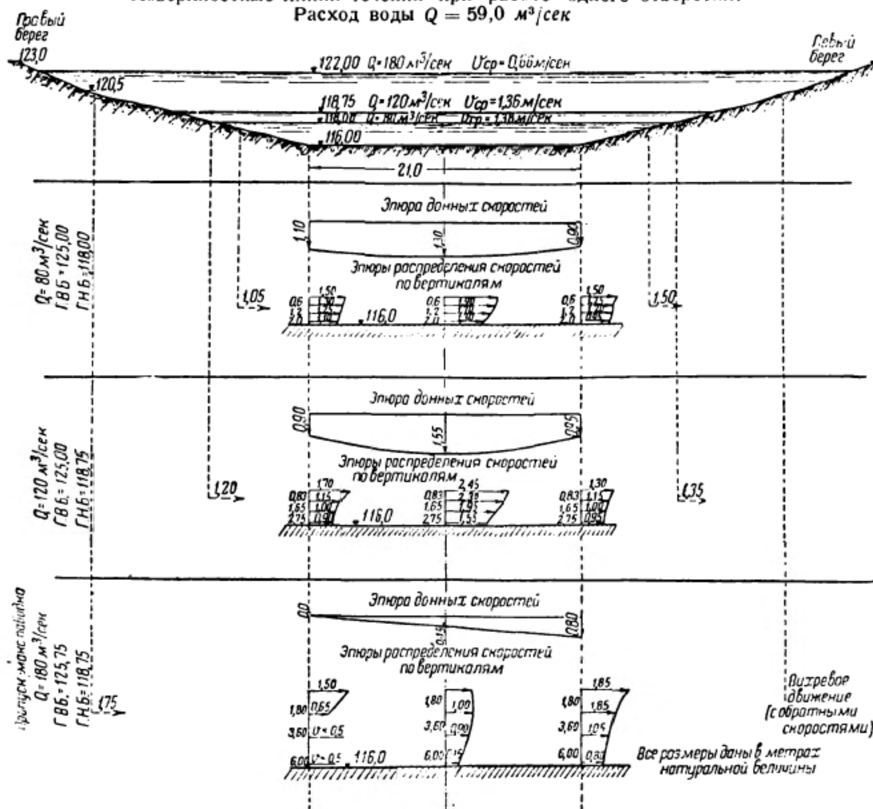
По абсолютной величине максимальные донные скорости получаются при первом аварийном случае ($Q = 120$ $м^3/сек$), достигая на втором створе значения $v = 1{,}55$ *м/сек*.

Значительный интерес представляет здесь вопрос гашения воронок, образовавшихся в верхнем бьефе при заборе воды через шахту.

Полагая, что установка над входным отверстием решетчатого плота, хотя и показавшего вполне удовлетворительные результаты, не является конструк-



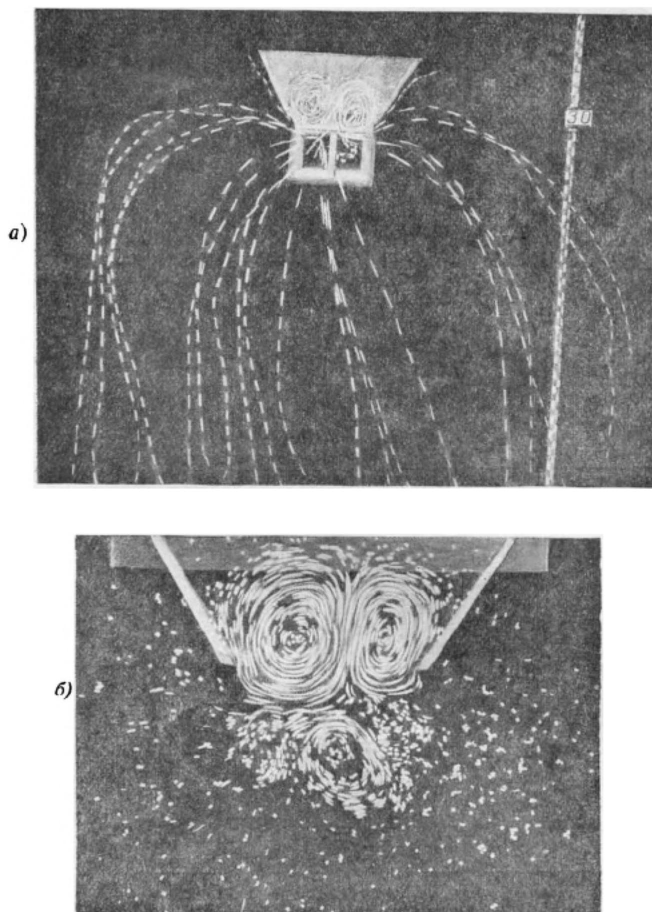
Фиг. 52. Результаты исследования шахтного водосброса № 3. Поверхностные линии течений при работе одного отверстия. Расход воды $Q = 59{,}0$ $м^3/сек$



Фиг. 53. Эпюры глубинных скоростей (в $м/сек$), замеренных трубкой Пито-Ребока во втором створе нижнего бьефа модели шахтного водосброса № 3 на расстоянии 0,12 $м$ от дна. Величины поверхностных скоростей определены фотографическим методом с помощью светящихся поплавков (расположение створов см. фиг. 51)

тивно достаточно совершенной, лаборатория поставила задачу подобрать такие направляющие стенки, которые бы препятствовали образованию воронок или смещали их в сторонуот входного отверстия водоспуска. В результате проведенной работы (изменения их числа, длины и места расположения) были подобраны две симметричные стенки, в результате чего работа входного отверстия водосброса для всех эксплоатационных и аварийных случаев значительно улучшилась (фиг. 54).

Как нетрудно заметить, направляющие стенки, перерезая линии токов, идущие параллельно дамбе (фиг. 54), смещают центры вихрей в сторону



Фиг. 54. Линии поверхностных токов в верхнем бьефе водосброса № 3 при расходе $Q = 59{,}0$ *м³/сек*

откоса, причем над входным отверстием вместо воронок наблюдается только вихревое (водоворотное) движение. Следует отметить, что подобная картина получается лишь при одинаковых открытиях затворов в обоих трубопроводах.

Таким образом в качестве одного из мероприятий для уничтожения аэрации потока при входе можно рекомендовать направляющие стенки. Это однако не исключает возможности одновременного применения и решетчатого плота.

4. ВЫВОДЫ

Исследование условий гашения кинетической энергии потока в нижнем бьефе сооружений на плоских и пространственных моделях, сравнение материалов, полученных на этих моделях между собой, а также сопоставление количественных показателей работы различных систем гасителей с качественной картиной размывов в нижнем бьефе позволили установить следующее:

1. Исследование гашения кинетической энергии в нижнем бьефе сооружений нельзя ограничивать опытами только в плоском решении; необходимо обязательно проводить и повторные исследования подобранной системы гасителей на пространственных моделях. Последнее особенно важно в том случае, если по фронту сооружения имеются различного типа водосбросные отверстия и следовательно различные системы гасителей или имеет место выход сбрасываемого потока в расширенный (по отношению к фронту сооружения) отводящий канал или отводящее русло.

2. Весьма целесообразным является наряду с замерами скоростей и фиксацией их распределения в плане и по вертикалям проводить опыты с размываемым руслом в нижнем бьефе с целью получения качественной картины размывов за гасителями.

3. Основным требованием, которое необходимо предъявлять к системе гасителей, является получение равномерного распределения потока по ширине отводящего канала или русла при любых возможных гидравлических режимах. Указанное требование может быть выполнено при нескольких различных системах гасителей; однако необходимо выбрать из них такую систему, которая была бы наиболее экономичной и надежной в данных условиях. Учитывая отмеченное, исследования по подбору гасителей должны проводиться особенно тщательно и продуманно.

Что касается технического разрешения этого вопроса, то здесь можно наметить три основные системы гасителей, которые на опытах показали вполне удовлетворительную работу:

1. Установление струенаправляющих стенок или раздельных бычков, которые, разбивая поток на ряд отдельных потоков, распределяют его по всей ширине водотока и тем самым облегчают работу гасителей, устанавливаемых в нижнем бьефе сооружений. Опыт работы подобных стенок в сочетании с простейшими гасителями подобно примененным на водосбросе № 3 вполне себя оправдал.

2. Установление обычных сплошных или зубчатых порогов различной высоты по фронту сооружения. При этом бо̀льшая высота соответствует месту сброса бо̀льших удельных расходов. Этот принцип, заложенный в основу гашения энергии в нижнем бьефе водосброса при плотине № 3, вполне себя оправдал.

3. Установление обычных сплошных порогов криволинейной или полигональной формы в плане. Установка порога такой формы также вполне оправдала себя, и при опытах, проведенных с таким порогом, примененным при первоначальном варианте водосброса № 3 (открытый тип), было получено вполне удовлетворительное растекание потока даже при неравномерной работе водосбросных отверстий.

Выбор одной из приведенных систем определяется в первую очередь условиями сброса расходов в нижний бьеф. На основе имеющегося опыта можно установить, что постановка раздельных струенаправляющих стенок или полигональных и криволинейных порогов будет более рациональна при широком фронте сбросов и сравнительно малых удельных расходах, а также в том случае, если сбрасываемый с сооружения поток необходимо распределить по широкому отводящему руслу. Наоборот, при больших удельных расходах с возможностью гашения энергии на узком фронте (равном фронту сброса) более предпочтительным будет решение с применением порогов различной высоты. Характерным в этом отношении примером может служить гашение энергии водосброса плотины № 3.

Из гасителей, примененных на сооружениях канала Москва — Волга, наибольшее распространение получил зубчатый порог. При исследовании ряда

сооружений канала зубчатый порог вполне доказал эффективность своей работы как гасителя кинетической энергии и как устройства, способствующего образованию за ним поверхностного режима.

Вторым устройством, связанным с работой гасителей энергии, является предохранительный плот («гребенка»). Устройство плота в конце рисбермы, с одной стороны, предохраняет сооружение от подмыва со стороны нижнего бьефа, а с другой, допуская размывы ложа, гарантирует образование весьма пологого откоса размыва за рисбермой, т. е. допускает размыв в пределах, совершенно безопасных для сооружения. Исследование подобного устройства, проведенное лабораторией как в плоском, так и в пространственном решении, полностью подтверждает сказанное.

5. В результате всех экспериментальных работ, проведенных лабораторией по изучению условий гашения кинетической энергии потока в нижнем бьефе сооружений, был получен ряд оригинальных решений в смысле типов и принципов гашения энергии. Эти решения, удовлетворяя гидравлическим требованиям и требованиям достаточной простоты и экономичности конструкции, вполне обеспечивают надежность работы сооружений.

Как общий вывод, основанный на опыте работы производственной лаборатории, хотелось бы отметить, что, несмотря на большой опыт работы в лаборатории Строительства и ряде других организаций, все же ощущается отсутствие руководящей теоретической нити в вопросах гашения энергии потока в нижнем бьефе сооружения. Поэтому нахождение рациональных и технически более совершенных решений зачастую зависит во многом от опыта того или иного исследователя.

Можно утверждать, что задача систематического экспериментального и теоретического изучения вопросов гашения энергии потока в нижнем бьефе сооружений является одной из наиболее актуальных и первоочередных задач, стоящих перед нашими научно-исследовательскими институтами и лабораториями.

ГЛАВА V

ИССЛЕДОВАНИЯ ОТВОДЯЩИХ КАНАЛОВ ВОДОСБРОСНЫХ СООРУЖЕНИЙ

1. УСТАНОВЛЕНИЕ ОЧЕРТАНИЙ ОТВОДЯЩИХ КАНАЛОВ

а) Плотина № 11

Наибольший интерес по установлению опытным путем формы отводящего канала представляет решение, полученное для бетонной плотины № 11[1]. Рассмотрим его более подробно.

Разработанный в проекте вариант расположенного здесь узла сооружений предусматривал устройство бетонной плотины и гидростанции в пойме левого берега реки (фиг. 55).

Расположение бетонной плотины не в русле, а в левобережной пойме было принято, исходя из условий производства работ. В гидравлическом отношении принятый вариант представлял недостаточно рациональное решение, поскольку с постройкой плотины на левом берегу создавались в нижнем бьефе неблагоприятные гидравлические условия для правобережных сооружений вследствие поперечного свала потока в коренное русло реки. В этом отношении особое беспокойство вызывал подходной участок к шлюзу, где при некотором направлении бокового свала потока могли возникнуть течения, по величине и направлению скоростей не допустимые для судоходства.

Характер поперечного свала потока, а следовательно и условия подхода судов к шлюзу определялись очертанием в плане канала, отводящего воду от плотины, на месте которого в дальнейшем должно было сформироваться новое русло.

Кроме того с выбором направления канала было связано и определенное количество предстоящих земляных работ по выемке: в случае прямого канала, предусмотренного в эскизном проекте, земляные работы по его выемке исчисля-

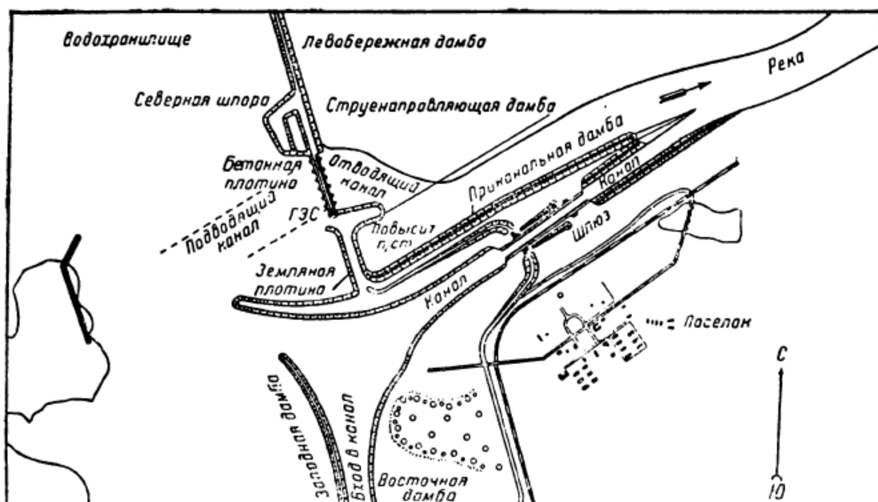
[1] Исследования проводились под руководством инж. А. И. Козловского.

лись в 1 700 000 $м^3$; поворотом же канала вправо при том же его поперечном сечении работы по выемке значительно снижались (на 50%).

Таким образом выбор направления отводящего канала являлся одной из существенных задач при проектировании, трудно поддающейся теоретическому разрешению вследствие сложности гидравлических явлений, которым должно было сопровождаться изменение естественного режима Волги в нижнем бьефе плотины.

В задачу предпринятых испытаний входило изучение общей гидравлической картины движения потока в нижнем бьефе на участке длиной 2 100 *м* от плотины вниз до входа в шлюз включительно с целью определения наиболее выгодного направления отводящего канала в отношении условий подхода судов к шлюзу, а также сокращения работ по выемке канала.

Для этой цели были исследованы два варианта отводящего канала, отличавшиеся друг от друга своим направлением в плане. В первом варианте (проект-



Фиг. 55. Схематический план узла с бетонной плотиной № 11

ном) отводящий канал имел прямолинейное направление, перпендикулярное оси плотины. Во втором (окончательном) варианте, разработанном лабораторией (фиг. 36), отводящий канал был повернут от плотины под углом 21° к первоначальному направлению (по первому варианту); угол поворота канала был намечен по теоретическому расчету, проведенному по методу инж. Н. М. Бернадского [1]. При этом расчетное очертание канала (фиг. 53) строилось, исходя из пропуска расхода $Q = 3\ 640\ м^3/сек$ и из предположения, что движение потока в дальнейшем будет параллельно приканальной дамбе (фиг. 56).

За основную схему в обоих вариантах принимался канал с шириной по дну 60,0 *м*; в конце опытов ширина канала по дну была увеличена до 80,0 *м*.

С целью более широкого освещения гидравлической картины в нижнем бьефе в каждом варианте кроме основной схемы был исследован ряд других случаев, воспроизводящих собой размыв берегов отводящего канала, что должно было неизбежно произойти вследствие значительных скоростей течения (1,50—2,5 *м/сек*) воды в отводящем канале. Одновременно с этим во втором варианте были произведены опыты по выбору рациональной длины струенаправляющей дамбы, примы-

---

[1] Н. М. Бернадский, Теория турбулентного потока и ее применение к построению течений в открытых водоемах. Гос. энерг. изд., 1933.

Бетонная плотина

Г.Э.С.

Земляная плотина

Приканальная дамба

Примечание: значение b, v, H и ρ для створов I, II, III, V, VII, IX, XI и XII не показаны

Фиг. 56. Теоретический расчет потока в отводящем канале бетонной плотины № 11:

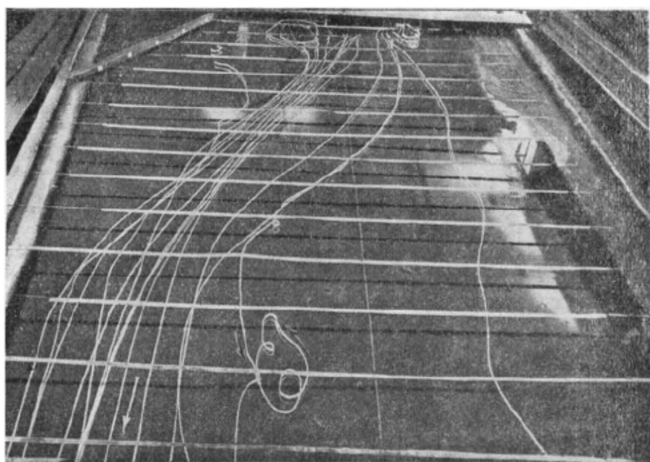
v — скорость потока в м/сек; b — ширина расчетных струй в мм; H — пьезометрическая высота в мм, считая от условной начальной отметки в 100 мм на про- границе потока у плотины; ρ — радиус кривизны в м

кающей к правому устою гидростанции, и типа сквозного сооружения (фиг. 59) [1], устанавливаемого у головы приканальной дамбы для гашения обратных скоростей на подходе к шлюзу (фиг. 52).

При выборе схемы отводящего канала в качестве критерия принимались следующие гидравлические элементы (по данным проектов):

1) в пределах судовой зоны, ширина которой была принята $B=100$ *м*, скорости положительного направления не должны были превосходить $v=1{,}0$ *м/сек*;

2) скорости обратных течений на подходе к шлюзу не должны были превышать величины $v=0{,}40$ *м/сек*, каковая соответствовала скорости движения судов на подходе к шлюзу со стороны нижнего бьефа;



Фиг. 57. Линии поверхностных токов в нижнем бьефе бетонной плотины № 11 при расходе воды $Q = 3\,640$ *м³/сек*

3) максимальный расход в период судоходства был принят равным $Q=3\,640$ *м³/сек*;

4) вдоль откоса приканальной дамбы по условиям крепления допустимой средней скоростью считалась скорость не выше 2,5 *м/сек*.

Не останавливаясь на описании результатов исследований обоих вариантов очертания отводящего канала, остановимся лишь на опытных данных по второму окончательному варианту и сопоставим их с данными, полученными непосредственно теоретическим путем.

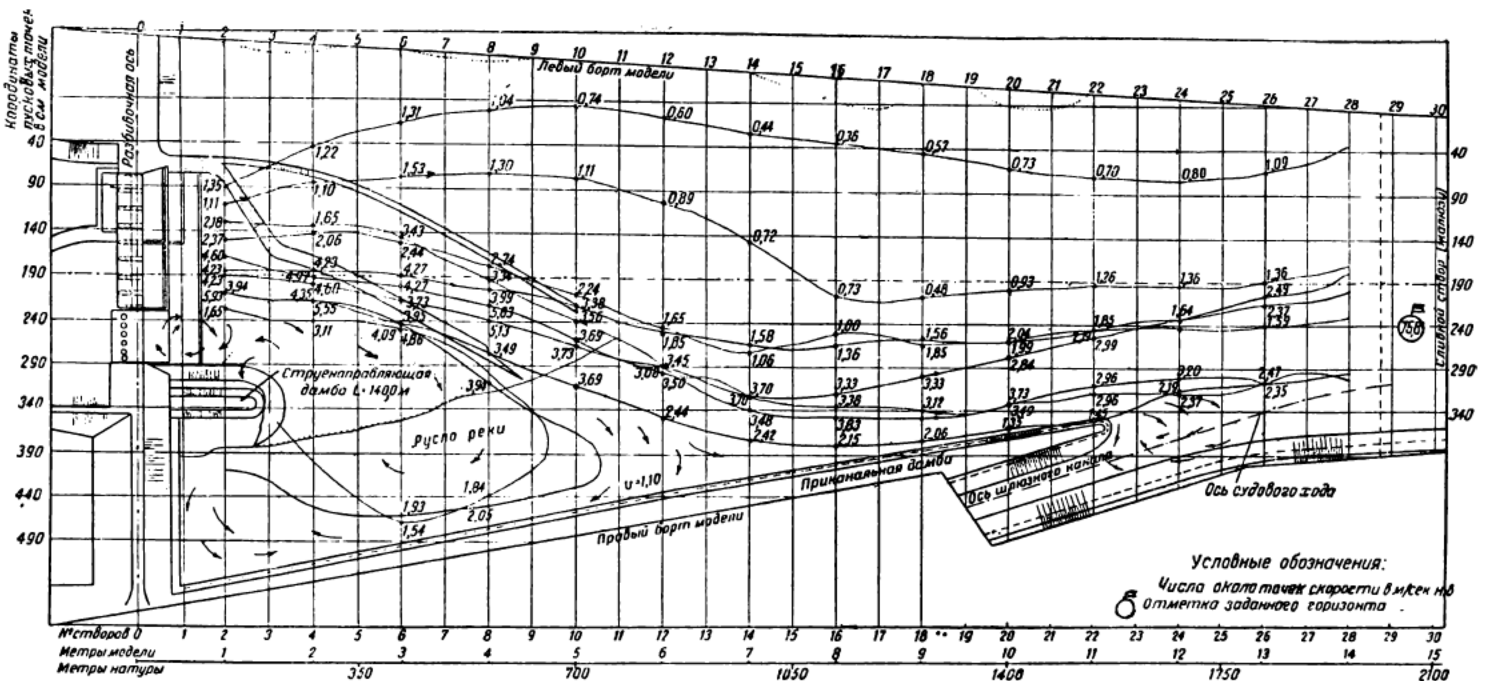
В результате расчета была получена приведенная на фиг. 56 ортогональная плановая решетка турбулентного потока с величинами средней скорости по ширине выделенных «турбоструй». Это теоретическое очертание и было положено в основу нового направления отводящего канала.

Новая схема канала была проверена на модели в масштабе 1 : 140 для двух расходов: $Q=6\,340$ *м³/сек* (максимальный паводок) и $Q=3\,640$ *м³/сек*, причем наблюдения производились только над поверхностными скоростями. Результаты наблюдений приведены на фиг. 57 и 58.

Из приведенных данных видно, что в обоих случаях левобережная пойма [2] работает слабо, в особенности при расходе $Q=3\,640$ *м³/сек*, и основной расход проходит по отводящему каналу. Вследствие этого в канале наблюдаются значительные скорости, достигающие на поверхности величины порядка 4,0—5,0 *м/сек* при $Q=6\,320$ *м/сек* (в начальном сечении скорости доходят до 6,0 *м/сек*) и 3,0—3,7 *м/сек* при $Q=3\,640$ *м³/сек*.

[1] В натуре не осуществленное.

[2] Теоретический расчет был произведен в предположении, что левобережная пойма в транзите потока не участвует.

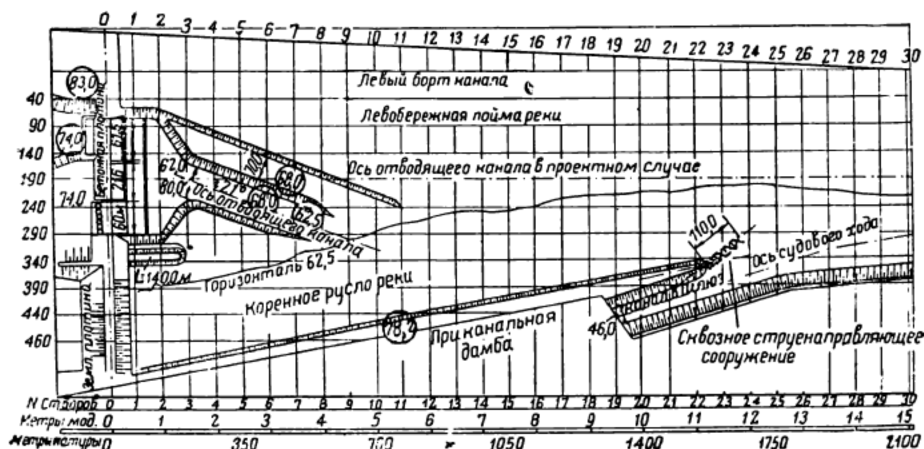


Фиг. 58. План нижнего бьефа бетонной плотины № 11 с показанием величины и направления поверхностных скоростей, замеренных на модели 1 : 140 с помощью поплавков и переведенных на натуру по закону Фруда. Схема опыта: $Q = 6\,320$ $м^3/сек$; Г. Н. Б. = 119,80 *м*. Отводящий канал круто повернут в коренное русло Волги. Правый откос канала и рельеф срезаны до отм. 62,5 *м*

В коренное русло реки поток вливается с меньшими скоростями и примерно на стрежне делится на две ветви, из которых одна (основная) движется вниз по течению параллельно приканальной дамбе (правому берегу), причем поверхностные скорости у откоса дамбы не превосходят 2,25 *м/сек* (при $Q=6\ 320$ *м³/сек*), а вторая поворачивает и движется в направлении, обратном основному течению (по направлению к земляной плотине), чем создается водоворот в староречье, лежащем выше устья отводящего канала. Скорости в зоне с обратными течениями не превышают 1,5 *м/сек*; у самого же откоса приканальной дамбы они изменяются в пределах 0,70—1,10 *м/сек* (при $Q=6\ 320$ *м³/сек*).

Ниже головы приканальной дамбы на участке длиной 150—200 *м*, прилегающем непосредственно к выходу из шлюза, поток движется почти параллельно оси судового хода, а затем, растекаясь вправо, приблизительно в 280 *м* встречается с осью судового хода под углом 10—20°.

При $Q=3\ 640$ *м³/сек* скорости в судовой зоне по левую сторону от оси судового хода изменяются в пределах 0,50—1,30 *м/сек*, т.е. примерно в два раза ниже, чем в проектном варианте, и ниже, чем при $Q=6\ 320$ *м³/сек*. Водоворотные тече-



Фиг. 59. Схематический план бетонной плотины № 11. Ось отводящего канала повернута под углом 21° к первоначальному направлению (окончательный вариант)

ния перед входом в шлюз становятся уже менее интенсивны: обратные скорости, наблюденные вправо от оси судового хода, не превышают 0,5 *м/сек*.

Сопоставляя данные, полученные теоретическим путем, с данными непосредственных наблюдений на модели (при $Q=3\ 640$ *м³/сек*), можно установить достаточно близкое их совпадение как в отношении очертания движения потока, так и в отношении величин полученных скоростей. Так например, по теоретическому расчету средняя скорость вдоль приканальной дамбы получалась в 1,50 *м/сек*, по данным же опытов — 1,40—1,60 *м/сек*. Небезынтересно отметить, что примерно такое же совпадение получилось и в водоворотных зонах как в их очертании, так и в величинах и распределении скоростей.

Таким образом проведенный цикл опытов позволяет, во-первых, сделать вывод о возможности поворота отводящего канала вправо от плотины с тем, чтобы вывести поток в коренное русло выше по течению реки, чем это было предусмотрено по проекту. Это в свою очередь обусловливает наиболее выгодное распределение скоростей на подходе к шлюзу, снижая их до пределов, безопасных для судоходства, и создает вдоль приканальной дамбы поверхностные скорости, не превышающие 2,5 *м/сек*, что допускает применение для крепления откоса обычной мостовой из камня.

Во-вторых, что особенно важно для проектирования, очертание отводящего канала для всех подобных случаев может быть с достаточной степенью прибли-

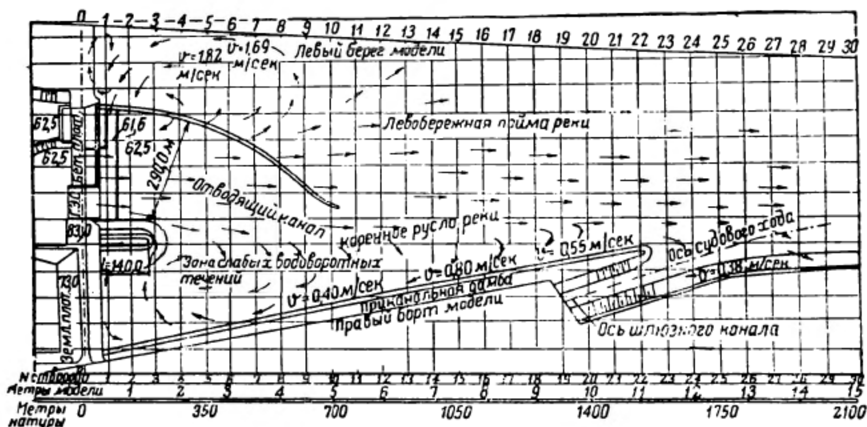
жения определено теоретически путем расчета по методу Н. М. Бернадского [1].

Не останавливаясь на описании всех опытов, проведенных лабораторией по установлению наивыгоднейшего очертания отводящего канала плотины № 11



Фиг. 60. Общий вид отводящего канала в нижнем бьефе бетонной плотины № 11 по окончательному варианту (модель 1 : 140)

и примыкающей к ней ГЭС (с точки зрения минимума земляных работ), допускающего в последующем доработку его самим потоком, отметим, что окончательный вариант очертания, приведенный на фиг. 59 (см. также фиг. 60), был получен уже



Фиг. 61. Исследования на модели 1 : 140 нижнего бьефа бетонной плотины № 11 при ширине отводящего канала 290 *м* (в предположении размыва запроектированного канала шириной 80 *м*). Схема опыта: $Q = 6\,320$ *м³/сек*, Г. Н. Б. = 76,70 *м*, стрелки показывают направления в плане поверхностных скоростей потока

с учетом ряда опытов, проведенных на частично размываемых моделях, которые позволили установить влияние размыва берегов на гидравлическую картину потока.

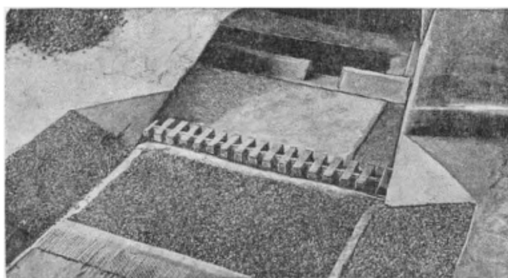
---

[1] Н. М. Бернадский, Теория турбулентного потока и ее применение к построению течений в открытых водоемах, 1933.

Опыты с размываемым руслом воспроизводили возможный размыв правого берега отводящего канала и всей его левобережной поймы. При этом выяснилось, что одновременно с дном отводящего канала размывается также и левобережная пойма. Так, при ширине отводящего канала по дну 80,0 *м* поверхностные скорости на бровке достигали при пропусках расходов 3 640—6 320 *м³/сек* величины 2,5—3,25 *м/сек*. С увеличением же ширины отводящего канала по дну до 290 *м* (в предположении размыва поймы и правого берега отводящего канала) (фиг. 60) поверхностные скорости на месте срезанной бермы в верхней части уменьшились при тех же расходах до 1,5 *м/сек*; на нижнем же участке в левой части канала поверхностные скорости измерялись величинами 2,5—3,0 *м/сек* (фиг. 61).

б) Формы сопряжений водобойной части с отводящим каналом

В результате проведенных лабораторных исследований на сооружениях канала были приняты в основном два вида сопряжения русла отводящего канала с водобойной частью сооружения: посредством «ныряющих» стенок и «косых» плоскостей. Характерным примером ныряющих стенок могут служить водосброс при земляной плотине № 3 и большинство донных водоспусков канала. Основное назначение стенок в этом случае (с гидравлической точки зрения) заключается в создании огражденного вертикальными стенками водобоя, на котором с помощью соответствующих гасителей энергии гасится кинетическая энергия потока. По мере гашения энергии потока боковые подпорные стенки уменьшают свою высоту, постепенно сходя на-нет («ныряющая» стенка). Сопряжение ныряющих стенок с откосами отводящего канала осуществляется наклонными плоскостями (фиг. 62), обеспечивающими дальнейшее плавное растекание потока по ширине отводящего канала. Применение для сопряжения ныряющих стенок с откосами канала разворота откосов не рекомендуется, так как он, как показали опыты, вызывает создание водоворотов, которые при сбросе расходов через сооружение влияют на режим потока в канале.



Фиг. 62. Общий вид водобойной части бетонного водосброса земляной плотины № 3 с устройством ныряющих стенок (модель 1 : 40)

Вторая форма сопряжения с помощью косых плоскостей дает в гидравлическом отношении при известных условиях наилучшее решение. В принципе подобное сопряжение заключается в том, что наклон подобной стенки сооружения постепенно увеличивается и становится равным наклону откоса отводящего канала. Подобное сопряжение применялось на тех сооружениях, где требовалось получить плавное растекание потока, сбрасываемого с сооружения по относительно широкому отводящему каналу. В качестве примера приводим фото с нижнего бьефа модели шахтного водосброса № 3 (фиг. 63).

Гидравлическая характеристика работы подобной схемы сопряжения усматривается из фиг. 64 и приведенных ранее фиг. 48 и 49.

На основании проведенных лабораторией исследований можно сделать следующие выводы.

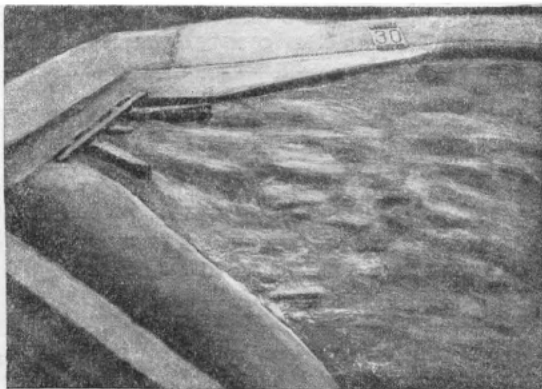
1. Для создания наилучших с гидравлической точки зрения условий гашения энергии струи в нижнем бьефе, особенно для сооружений, сбрасывающих большие удельные расходы с значительными скоростями (донные водоспуски), необходимо иметь водобой, ограниченный вертикальными или слабо наклонными стенками, в пределах, достаточных по своей длине для гашения энергии и следовательно для установки системы гасителей. В дальнейшем подпорные стенки могут переходить или в «ныряющие стенки» или в косые плоскости.

2. Установление сопряжения, т. е. выбор ныряющих стенок или косых плоскостей, определяется в гидравлическом отношении условиями растекания. При необходимости достигнуть плавного растекания потока при относительно большой ширине отводящего русла (по отношению к ширине отверстия) или при пологих откосах отводящего канала следует отдавать предпочтение устройству косых плоскостей как создающих более совершенные и в гидравлическом отношении лучшие условия для растекания потока.

3. В случае применения ныряющих стенок сопряжение их с откосом отводящего русла или канала следует осуществлять одной наклонной плоскостью [1].



Фиг. 63. Модель шахтного водосброса № 3. Сопряжение водобойной части сооружения с отводящим каналом посредством косых плоскостей.



Фиг. 64. Модель водосброса № 3. Картина потока в нижнем бьефе при пропуске расхода $Q = 120$ *м³/сек*

2. КРЕПЛЕНИЕ РУСЛА ЗА СООРУЖЕНИЕМ

На канале Москва —Волга были применены следующие основные типы крепления русла:

1) одиночная мостовая;
2) двойная мостовая;
3) каменная наброска в ряжевых клетках;
4) железобетонные плиты.

Специальных исследований по установлению гидравлических характеристик этих типов креплений не производилось. Исключение составляет только крепление бетонными плитами; по этому вопросу лабораторией было проведено теоретическое и экспериментальное исследование.

Отсутствие специальных исследований, на основании которых можно было бы устанавливать наиболее рациональный тип креплений откосов русла или рисбермы, обусловило необходимость при выборе того или иного типа крепления руководствоваться лишь величинами скоростей, замеряемыми на модели, и по ним (предварительно переводя их на натуру по закону подобия), пользуясь установленными справочными данными, подбирать тип крепления и его размеры.

Поэтому, не останавливаясь на этом вопросе, поскольку работы лаборатории не могут существенно изменить или дополнить его, коснемся лишь тех теоретических и опытных исследований, которые были проведены лабораторией по установлению гидравлических характеристик крепления русла железобетонными плитами.

[1] Этот вывод является спорным. Применение в этом случае косых плоскостей дает лучшее решение. *Редколлегия.*

3. УСТОЙЧИВОСТЬ ОБЛИЦОВОЧНЫХ ПЛИТ В ПОТОКЕ ВОДЫ[1]

В случае крепления дна каналов бетонными плитами прямоугольной формы, уложенными без выступов в одной и той же плоскости, каждая плита оказывается защищенной от лобового воздействия потока лежащими впереди плитами. Таким образом к отдельным плитам горизонтальные гидродинамические силы здесь не приложены, и поэтому нельзя ожидать опрокидывания или сдвига плит.

Действительно, опыт показывает, что при разрушении крепления отдельные плиты как бы всплывают из своих гнезд, после чего подхватываются потоком и уносятся вниз по течению.

Такое «всплывание» плит возможно лишь при наличии вертикальной составляющей гидродинамического воздействия потока на плиту, т. е. при вырывании плиты давление на верхнюю ее поверхность сказывается значительно меньше, чем на нижнюю. Эта разность давлений к моменту вырывания равна весу плиты в воде, а затем и превышает его.

Объяснить сущность явления вырывания плит, не подверженных лобовому воздействию, возможно лишь свойствами турбулентного течения воды.

В самом деле, турбулентный поток состоит из движущихся конечных размеров вихрей, вследствие чего в каждой точке потока имеют место непрерывные пульсации как скоростей, так и давлений. Особенно интенсивные пульсации наблюдаются у поверхности дна, где наличие вихрей вызывает появление периодически меняющих направление вертикальных токов. При движении вверх конечных масс жидкости плита стремится вырваться из своего гнезда, при движении вниз она сильнее прижимается к подстилающему слою.

Таким образом кроме постоянной силы гидростатического выталкивания на плиту действует периодически меняющая знак пульсационная сила, обусловленная прохождением над плитой вихрей. Когда величина этой силы превысит (на ничтожную долю) величину веса в воде плиты, то последняя «всплывает» из своего гнезда, подхватывается и уносится потоком. Всплывание происходит в течение того полупериода, когда сила направлена вверх.

Следующие плиты (после первой вырванной) выносятся из своих гнезд уже под действием как пульсационных сил, так и сил лобового воздействия потока, вследствие чего дальнейшее разрушение крепления происходит весьма интенсивно. Такова физическая сущность рассматриваемого явления.

Рассмотрим теперь физические величины, определяющие пульсационную силу.

Эта сила, вызываемая вихрями, которые можно рассматривать как результат сложения продольных и поперечных колебаний конечных масс жидкости, является силой инерционной, т. е. ее величина определяется ускорением и массой. Отнесем силу к единице площади плиты, т. е. рассмотрим пульсационное давление. Амплитуда этого давления определяется массой колеблющегося над плитой столба жидкости (с единичной площадью основания) и средним в вертикальном направлении ускорением. Масса выражается через плотность ρ и глубину потока h; ускорение колеблющегося в вертикальном направлении столба в основном определяется распределением скоростей по вертикали, так как каждой эпюре соответствует поток вполне определенной структуры.

Вполне естественным является предположение, что распределение скоростей в верхних слоях потока не оказывает существенного влияния на величину пульсационного давления, так как оно определяется главным образом явлениями, происходящими в придонном слое. Кинематика придонного слоя может быть охарактеризована двумя величинами: угловой скоростью ω вращения придонных вихрей и их поступательной скоростью v_0. Реальные вихри, образующиеся у дна, имеют очень сложную структуру; в каждой точке вихря частицы движутся с раз-

[1] Произведенное исследование ограничивается лишь установлением основной зависимости и не претендует на полное решение вопросов, связанных с устойчивостью креплений; предлагаемая теория является лишь первым этапом в решении достаточно обширной гидротехнической проблемы. Работа выполнена научным сотрудником Ю. Д. Городковым.

личными угловыми скоростями, к тому же непрерывно изменяющимися; поэтому здесь можно говорить лишь о некоторой средней угловой скорости, величину которой будем оценивать градиентом $\frac{dv}{dy}$ по вертикали, средним в пределах донного слоя; под донной скоростью v_0 будем подразумевать также среднее ее значение в пределах донного слоя, толщина которого равна ширине вихря.

Таким образом амплитуда P пульсационного давления зависит, вообще говоря, от следующих величин: 1) глубины потока h, 2) придонной скорости v_0, 3) плотности жидкости ρ, 4) угловой скорости донных вихрей ω (градиента) и 5) длины плиты l. Искомая зависимость в общем виде запишется так:

$$\Phi(P,\ h,\ v_0,\ \rho,\ \omega,\ l) = 0. \tag{7}$$

Для установления структуры формулы (7) воспользуемся известной ПИ-теоремой анализа размерностей [1]. Рассматриваемое явление — механическое; поэтому все физические единицы могут быть выражены через три основные или первичные единицы, и зависимость (7) между шестью переменными может быть на основании ПИ-теоремы сведена к зависимости между тремя безразмерными произведениями Π_1, Π_2 и Π_3, т. е. представлена в виде:

$$f(\Pi_1,\ \Pi_2,\ \Pi_3) = 0. \tag{8}$$

Найдем безразмерные произведения Π_1, Π_2 и Π_3.

Для удобства за первичные физические единицы примем единицы следующих величин: 1) глубины h, 2) придонной скорости v_0 и 3) плотности воды ρ.

В табл. 14 приведены размерности всех величин, входящих в выражение (7).

Таблица 14

Наименование величин	Буквенные обозначения	Формулы размерностей	
Глубина потока над плитой	h	L	Первичные единицы
Придонная скорость	v_0	$[v]$	
Плотность жидкости	ρ	$[\rho]$	
Угловая скорость придонного вихря	ω	$[L^{-1}v]$	Вторичные единицы
Длина плиты	l	$[L]$	
Амплитуда пульсационного давления	P	$[v^2\rho]$	

Каждая из величин Π представляет произведение степеней первичных величин на одну из вторичных величин в первой степени:

$$\begin{aligned} \Pi_1 &= h^{x_1} v_0^{y_1} \rho^{z_1} \omega; \\ \Pi_2 &= h^{x_2} v_0^{y_2} \rho^{z_2} l; \\ \Pi_3 &= h^{x_3} v_0^{y_3} \rho^{z_3} P. \end{aligned} \tag{9}$$

Пользуясь приведенной таблицей и учитывая, что произведения Π безразмерны, находим показатели степеней x_1, y_1, ...; подстановка найденных значений показателей в выражение (9) дает:

$$\Pi_1 = \frac{h\omega}{v_0};\quad \Pi_2 = \frac{l}{h};\quad \Pi_3 = \frac{P}{\rho v_0^2}; \tag{10}$$

следовательно функциональная зависимость (9) может быть теперь представлена так:

$$f\left(\frac{h\omega}{v_0},\ \frac{l}{h},\ \frac{P}{\rho v_0^2}\right) = 0. \tag{11}$$

[1] П. В. Бриджмен, Анализ размерностей, Гостехтеориздат, 1934.

Предполагая последнее уравнение разрешенным относительно переменной $\frac{P}{\rho v_0^2}$, имеем:

$$\frac{P}{\rho v_0^2} = \varphi\left(\frac{l}{h}, \frac{h\omega}{v_0}\right)$$

или

$$P = \rho v_0^2 \cdot \varphi\left(\frac{l}{h}, \frac{h\omega}{v_0}\right). \quad (12)$$

Для раскрытия вида функции φ обратимся к физической сущности явления. Пульсационное давление вызывается прохождением вихрей, интенсивность которых определяет величину амплитуды P. Мы вправе представить себе мысленно, что всей жидкости, протекающей над плитами, придана дополнительная постоянная скорость u. Прибавление постоянной скорости u во всех точках потока не вызовет дополнительных ускорений, следовательно не вызовет и изменения угловых скоростей и инерционных сил. Такое прибавление постоянной скорости не нарушит структуры данного потока, а следовательно не изменит и амплитуды пульсационного давления; изменится при этом лишь период пульсаций.

Таким образом два потока одинаковой структуры, т. е. имеющие одинаковые глубины и угловые скорости, но движущиеся с различными поступательными скоростями, будут оказывать на плиты одинаковое воздействие; иначе говоря, поток, имеющий глубину h и угловую скорость ω донных вихрей, оказывает на данную плиту длины l совершенно определенное пульсационное давление P, какова бы ни была при этом его поступательная скорость.

Отсюда следует, что формула, дающая величину амплитуды давления, не должна содержать величину поступательной скорости: кроме плотности жидкости ρ, глубины h и длины плиты l в нее должна входить только угловая скорость донных вихрей (градиент).

Это условие вполне определяет структуру функции φ в выражении (12): для того чтобы скорость v_0 выпала, необходимо и достаточно, чтобы функция представляла относительно переменной $\frac{h\omega}{v_0}$ одночлен второй степени, так как лишь в этом случае φ сокращается.

Итак полагаем:

$$\varphi\left(\frac{l}{h}, \frac{h\omega}{v_0}\right) = \psi\left(\frac{l}{h}\right) \cdot \left(\frac{h\omega}{v_0}\right)^2, \quad (13)$$

где ψ — некоторый коэфициент, который в общем случае мы обязаны считать зависящим от относительной длины плиты (по сравнению с глубиной потока).

Подставляя значение (13) в выражение (12), имеем:

$$P = \psi\rho\,(h\,\omega)^2. \quad (14)$$

Выясним характер зависимости коэфициента ψ от отношения $\frac{l}{h}$.

Здесь возможны три случая:

1) l во много раз превосходит глубину потока h; тогда в любой момент времени на поверхности каждой плиты будет помещаться одновременно большое количество вихрей, в результате чего осредненное по длине l пульсационное давление равно нулю, т. е. $\psi=0$.

2) l в несколько раз меньше глубины потока h, и следовательно длина плиты незначительна по сравнению с размерами вихря. Среднее по поверхности плиты давление мало отличается от давления в данной точке, например в центре плиты; следовательно среднее давление не зависит от длины l, т. е. $\psi = \text{const}$.

3) При длине плиты того же порядка, что и расстояние между соседними вихрями, передний и задний края плиты в каждый момент испытывают давления противоположных знаков, плита стремится вывернуться попеременно то перед-

ним, то задним концом. В этом случае $0<\psi<\mathrm{const}$. Таким образом при малых значениях $\frac{l}{h}$ коэфициент ψ постоянен, затем при увеличении $\frac{l}{h}$ он уменьшается и при достаточно больших $\frac{l}{h}$ делается равным нулю.

При расчетах тем не менее можно всегда считать $\psi=\mathrm{const}$, так как в случае, если мы будем иметь значения $\frac{l}{h}$, при которых ψ уже не постоянно (при практически применяемых значениях $\frac{l}{h}$ величина ψ будет мало отличаться от $\psi=\mathrm{const}$, получаемой при малых $\frac{l}{h}$), то, принимая $\psi=\mathrm{const}$, определим немного преувеличенную против действительности величину пульсационного давления, что заставит запроектировать несколько более толстые плиты, т. е. пойти в сторону некоторого увеличения запаса устойчивости.

Опыты, описание которых приведено ниже, показали, что в исследованном (довольно широком) диапазоне значений $\frac{l}{h}$ коэфициент ψ действительно является величиной практически постоянной.

Таким образом амплитуда пульсационного давления, действующего на плиты, уложенные без выступов с небольшими зазорами, определяется формулой (14), причем для плит малой длины коэфициент ψ, входящий в эту формулу, является величиной постоянной.

Сопоставим формулу (14) с обычным типом квадратичной зависимости сил от скоростей. Для этого умножаем и делим правую часть формулы (14) на v_0^2. Получаем:

$$P = C\rho v_0^2, \tag{15}$$

где

$$C = \psi\frac{h^2\omega^2}{v_0^2}, \tag{16}$$

Аналогичную зависимость (15) дает проф. В. Н. Гончаров, причем он полагает возможным считать в своей формуле коэфициент C величиной постоянной[1].

К аналогичной зависимости приходит и доц. А. И. Лосиевский:

$$v = \alpha\sqrt{\left(\frac{\gamma_1}{\gamma} - 1\right)\delta}, \tag{17}$$

где v — скорость, при которой происходит вырывание плиты толщиной δ; γ_1 γ — объемные веса материала плиты и воды.

Выражение (17), как нетрудно заметить, получается приравниванием правой части выражения (15) весу плиты в воде, отнесенному к единице площади [т. е. величине $(\gamma_1-\gamma)\delta$] с последующим решением относительно v полученного уравнения. Коэфициенты α и C связаны соотношением:

$$\alpha = \sqrt{\frac{g}{C}}, \tag{18}$$

где g — ускорение силы тяжести.

Из (10) и (12) имеем также:

$$\alpha = \frac{K}{\Pi}, \tag{19}$$

---

[1] Проф. В. Н. Гончаров, О взвешивании наносов, Госстройиздат, 1933.

где

$$\Pi = \frac{h\omega}{v_0} = \frac{h}{v_0}\left(\frac{dv}{dy}\right)_0 \tag{20}$$

и

$$K = \sqrt{\frac{g}{\psi}}. \tag{21}$$

Таким образом предполагаемую нами основную зависимость (14) мы формально свели к виду (15). Однако между выражениями (14) и (15) имеется глубокое принципиальное различие. Это различие заключается в том, что выражение (15) представляет квадратичную зависимость давления P от поступательной скорости v_0, в то время как коэфициент C согласно соотношению (16) является величиной, обратно пропорциональной квадрату скорости, вследствие чего в нашем выражении давления скорость вообще отсутствует. Правда, в формулу (14) входит угловая скорость ω, которая в свою очередь связана с поступательной скоростью потока; но поступательная скорость не является единственным аргументом, определяющим величину угловой скорости вихрей: угловая скорость зависит также от целого ряда факторов (например режима — бурное, спокойное течение, прыжок), определяющих распределение скоростей в потоке. Различными (чисто механическими) мероприятиями можно создать два потока, отличающиеся друг от друга как донными, так и средними скоростями, но имеющие тем не менее одинаковые глубины h и угловые скорости ω (одинаковые градиенты в придонной зоне). Два такие потока будут согласно формуле (14) действовать на плиты с одинаковой силой P. Таким образом в качестве физического аргумента, непосредственно определяющего амплитуду пульсационного давления на плиту, нужно принять не поступательную, а угловую скорость. Другими словами, простой квадратичной зависимостью вида (15) или (17) с постоянными коэфициентами явление охвачено быть не может.

Вскроем физический смысл величины Π в выражении (19).

Нетрудно сообразить, что, измеряя все скорости v в долях от донной скорости v_0 и все расстояния от дна в долях глубины h, т. е. вводя безразмерные величины

$$\xi = \frac{y}{h}; \quad \eta = \frac{v}{v_0},$$

имеем:

$$\Pi = \frac{d\eta}{d\xi}, \tag{22}$$

т. е. величина Π является безразмерным градиентом скорости по вертикали.

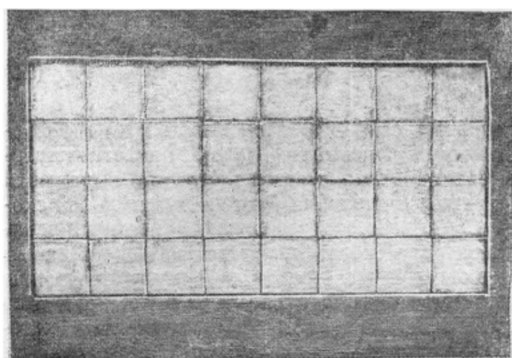
Из выражения (19) следует, что коэфициент α изменяется обратно пропорционально Π, т. е. между α и безразмерным градиентом Π существует обратно пропорциональная зависимость, графически изображаемая гиперболой.

Подбирая опытным путем гидравлические условия, при которых вырывается плита, мы получаем пару опытных значений α, Π; изменяя как объемный вес плиты, так и гидравлические условия, мы можем получить целую серию опытных точек α, Π, отвечающих каждый раз моменту вырывания плиты. Согласно выдвигаемой теории α является однозначной функцией Π, выражаемой уравнением (19); поэтому опытные точки, полученные при разнообразных гидравлических условиях, должны уложиться на гиперболу, а не давать неопределенное поле как-нибудь разбросанных по плоскости точек.

Опыты, краткое описание и результаты которых мы приводим, показали, что коэфициент α, являясь непостоянной величиной, действительно изменяется обратно пропорционально безразмерному градиенту Π, чем подтверждается справедливость основной зависимости (14).

Таким образом нужно признать, что положения, на которых построена теория, действительно отвечают физической сущности явления. Опытное исследо-

вание устойчивости бетонных плит производилось в плоском лотке шириной 0,5 *м*. В этом лотке был устроен горизонтальный деревянный пол из гладко оструганных и окрашенных масляной краской досок. За ними находился исследуемый участок, вымощенный плитами таким образом, что верхняя поверхность плит находилась в одной плоскости с полом; длина участка с плитами равнялась 60 *см*; за опытным участком с плитами деревянный пол был продолжен почти до конца лотка. Исследуемый участок представлял собой деревянный ящик, в который плиты укладывались на шляпки гвоздей, вбитых в дно ящика; шляпки всех гвоздей выходили выше дна ящика на 1 *см*. Таким образом под плитами всегда был слой воды в 1 *см*, проникающей туда через зазоры между плитами.



Фиг. 65. Вид сверху на опытный участок лотка с уложенными плитками

Засыпка пространства под плитами песком или гравием, как показали предварительные опыты, не вызывала изменения устойчивости плит; поэтому оказалось возможным проводить опыты с плитами, уложенными на шляпки гвоздей без засыпки, что избавляло от добавочной затраты времени на засыпку и выравнивания песка или гравия после каждого опыта.

В зависимости от толщины исследуемых плит дно ящика с вбитыми в него гвоздями устанавливалось на такой высоте, чтобы верхняя поверхность плит была на одном уровне с деревянным полом лотка.

В табл. 15 приведены геометрические размеры, удельные веса, а также материал исследованных плит.

Таблица 15

№ п/п	Размеры в *см*	Материал	Объемный вес в *г/см*³
1	5,0 × 5,0 × 1,0	Цементный раствор . . .	1,87 — 2,24
2	5,0 × 5,0 × 1,0	Парафин со свинцом . .	1,09 — 1,10
3	5,0 × 5,0 × 1,0	То же	1,24 — 1,25
4	7,5 × 7,5 × 1,5	»	1,09
5	10,0 × 10,0 × 2,0	»	1,07
6	10,0 × 10,0 × 2,0	»	1,60 — 1,62
7	10,0 × 10,0 × 1,0	»	2,11 — 2,18
8	15,0 × 15,0 × 1,0	»	2,21 — 2,39
9	5,0 × 10,0 × 1,0	»	2,12 — 2,22

Плиты укладывались совершенно свободно; ширина щелей между поперечными и продольными рядами составляла 1,5—2,0 *мм*.

Для того чтобы исследование устойчивости плиток соответствовало условиям плоской задачи, края опытного участка, прилегающие к стеклам плоского лотка, были исключены из рассмотрения, а именно: по краям участка на всю его длину вместо плиток ставились деревянные вкладыши шириной по 10 *см*; таким образом из полуметровой ширины лотка исследуемый участок занимал только 30 *см*.

После того как происходило вырывание какой-нибудь плиты, последняя укладывалась вновь на свое место и закреплялась; затем трубкой Пито-Ребока над ней замерялись скорости в двух точках: на расстояниях 4 и 8 *мм* от дна. Скорость в первой точке принималась в качестве донной, разность скоростей Δv

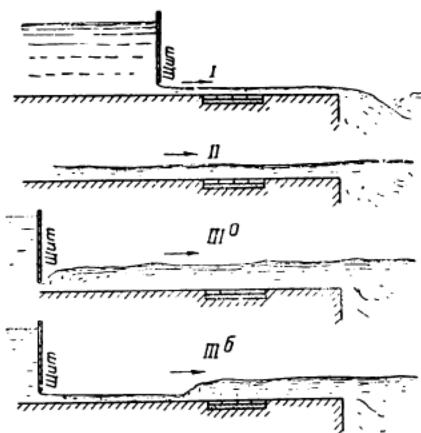
в этих точках, деленная на расстояние между ними $\Delta y = 0{,}004$ *м*, давала приближенное значение среднего в придонной зоне градиента $\omega = \frac{dv}{dy}$ [1].

Кроме того фиксировались прочие условия, соответствующие моменту вырывания, а именно — замерялись расход и глубина потока h над плитой; кроме того тщательно определялся объемный вес вылетевшей плитки.

Каждый опыт продолжался от 3 до 11 раз в зависимости от устойчивости результатов; всего было проведено 136 опытов.

Для получения возможно более широкого диапазона скоростей и градиентов опыты проводились при всевозможных гидравлических условиях, а именно: при «спокойном» и «бурном» течении, а также в условиях затопленного и отогнанного прыжка. Кроме того путем набивания планок и наклейки гальки на пол перед исследуемым участком варьировалась шероховатость.

Обстановка опытов при различных гидравлических условиях иллюстрируется фиг. 65 и 66.



Фиг. 66. Схемы установок для испытаний устойчивости плиток: Q — расход воды; H — глубина потока над плиткой; v_0 — скорость над плиткой на расстоянии 4 *мм* от дна, принимаемая за придонную скорость; ω — угловая скорость донных вихрей.

I. Бурное течение (серии опытов № 15—19): $Q = 0{,}053 \div 0{,}071$ *м³/сек*; $H = 0{,}05 \div 0{,}06$ *м*; $v_0 = 1{,}85 \div 2{,}28$ *м/сек*; $\omega = 45 \div 93$ сек.$^{-1}$

II. Спокойное течение (серии опытов №1—6): $Q = 0{,}023 \div 0{,}079$ *м³/сек*; $H = 0{,}07 - 0{,}19$ *м*; $v_0 = 0{,}27 \div 0{,}71$ *м/сек*; $\omega = 6 \div 18$ сек.$^{-1}$

IIIа. Затопленный прыжок (серии опытов № 7—10): $Q = 0{,}045 \div 0{,}066$ *м³/сек*; $H = 0{,}21 \div 0{,}34$ *м*; $v_0 = 0{,}24 \div 0{,}62$ *м/сек*; $\omega = 9 \div 22$ сек.$^{-1}$

IIIб. Отогнанный прыжок (серии опытов № 11—14): $Q = 0{,}061 \div 0{,}074$ *м³/сек*; $H = 0{,}17 \div 0{,}24$ *м*; $v_0 = 0{,}00 \div 0{,}54$ *м/сек*; $\omega = 7 \div 34$ сек.$^{-1}$

Из выражения (17) имеем:

$$\alpha = \frac{v_0}{\sqrt{\left(\frac{\gamma_1}{\gamma} - 1\right)\delta}}. \tag{23}$$

Подстановка опытных значений h, v_0, $\frac{dv}{dy}$ γ_1, $\gamma = 1$ *г/см³* и δ в выражения (23) и (20) дает соответственно опытные значения α и Π.

Подстановка полученных таким образом значений α и Π в выражение (19) дает соответствующее каждому опыту значение коэфициента K:

$$K = \alpha \Pi. \tag{24}$$

Ввиду большого разброса точек, вызываемого случайными отклонениями (свойственными турбулентному потоку) отдельных амплитуд давлений и скоростей от их средних значений, каждый опыт повторялся несколько раз. Осредненные по каждой серии опытов значения α и Π приведены в табл. 16. Там же приведены значения коэфициентов K, полученные перемножением осредненных значений α и Π.

[1] Для более точного определения градиента ω следовало бы провести более детальные исследования по изучению распределения скоростей по вертикали в придонном слое.

Таблица 16

Осредненные значения величин α, П и K по данным опытов

№ серий опытов	Характер потока	Размеры плиты в *см*	Объемный вес плиты в *г/см*³	Число опытов	Осредненные по каждой серии значения: α в $м^{1/2}$ $сек^{-1}$	Осредненные по каждой серии значения: П	Глубина потока h в *м*	Относительная длина $\frac{l}{h}$	$K=\alpha\Pi$ в $м^{1/2}$ $сек^{-1}$
	I								
15	Бурное течение	10× 10×1	2,05–2,12	10	19,80	1,67	0,057	1,76	33,0
16		10× 5×1	2,20–2,22	10	19,00	1,43	0,056	1,32	27,2
17		5× 10×1	2,20–2,22	11	19,40	1,56	0,058	0,86	30,2
18		5× 5×1	2,16	4	18,40	2,16	0,059	0,85	39,8
19		7,5×7,5×1	2,05	7	18,10	2,38	0,059	1,27	43,1
	II								
1	Спокойное течение	5× 5×1	1,10	7	11,10	2,70	0,104	0,48	30,0
2		5× 5×1	1,24–1,25	10	11,40	2,96	0,119	0,42	33,8
3		5× 5×1	1,24	3	14,10	3,31	0,167	0,30	45,6
4		7,5×7,5×1,5	1,09	7	8,80	2,94	0,146	0,51	34,7
5		10× 10×2	1,07	9	11,80	2,41	0,130	0,77	28,4
6		5× 5×1	1,11	10	14,70	2,09	0,081	0,62	30,7
	IIIa								
7	Затопленный прыжок	5× 5×1	1,87–2,19	7	4,65	8,18	0,231	0,22	38,0
8		5× 5×1	2,15–2,24	4	2,87	15,18	0,331	0,15	43,5
9		10×10×2	1,60–1,62	7	3,17	13,41	0,312	0,32	42,5
10		10×10×2	1,60–1,62	8	3,98	7,89	0,318	0,31	31,4
	IIIb								
11	Отогнанный прыжок	5× 5×1	2,15–2,18	7	3,59	9,93	0,220	0,23	36,6
12		10×10×1	2,11–2,12	8	1,93	19,65	0,207	0,48	37,2
13		15×15×1	2,21–2,39	4	2,40	22,92	0,221	0,68	55,0
14		15×15×1	2,21	3	2,14	22,70	0,225	0,67	48,6
		Всего опытов . . .		136		Среднее взвешенное			35,3

Из приведенных данных видно, что значения K колеблются около некоторого среднего значения $K_{cp}=35{,}3$ $м^{1/2}сек^{-1}$. Но, как уже было ранее выяснено, величина ψ, а следовательно и связанная с ней соотношением (21) величина K является, вообще говоря, функцией $\frac{l}{h}$, причем при малых значениях $\frac{l}{h}$ величина K постоянна, при больших же значениях она изменяется с возрастанием $\frac{l}{h}$. Таким образом отклонение отдельных значений K от их среднего значения может быть обусловлено как случайными причинами, так и систематическим влиянием отношения $\frac{l}{h}$. Для выяснения этого вопроса построен график значений K (а также ψ) в функции $\frac{l}{h}$ (фиг. 67). На этом графике приведены средние взвешенные значения K.

Группировка при взвешивании производилась по двум признакам: а) взвешивание K и ψ по равным интервалам значений $\frac{l}{h}$ и б) взвешивание точек, сгруппированных по режимам потока. В обоих случаях точки группируются около прямой $K=\text{const}=35{,}3$ $м^{1/2}$ $сек^{-1}$ (или $\psi=\text{const}$); следовательно отклонения отдельных значений K от среднего вызываются лишь случайными причинами, т. е. в исследованном диапазоне еще не обнаруживается систематическое влияние отношения $\frac{l}{h}$ на величину K.

Следствием постоянства K является то, что все опытные точки (α_i, Π_i) должны группироваться только около одной вполне определенной гиперболы:

$$\alpha = \frac{35{,}3}{\Pi}, \qquad (25)$$

что подтверждает фиг. 68.

На фиг. 68,*б* нанесены результаты всех 136 проведенных опытов, а на фиг. 68,*а* — осредненные значения α и Π, приведенные в табл. 16. Последний график достаточно убедительно подтверждает справедливость соотношения (19), а следовательно и формулы (24).

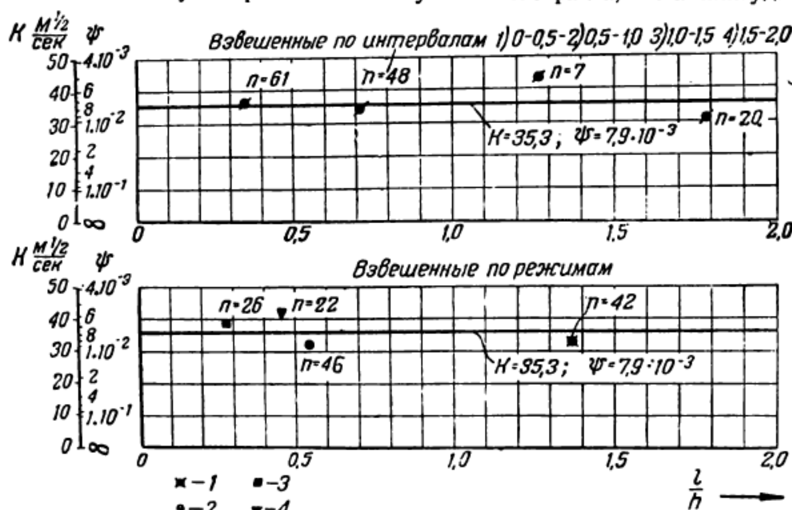
Подставляя определенное опытным путем значение $K=35{,}3$ $м^{1/2}сек^{-1}$ в выражение (21), находим:

$$\psi = 7{,}9 \cdot 10^{-3},$$

что по подстановке в формулу (14) дает окончательное выражение для средней амплитуды пульсационного давления на плиту:

$$P_{cp} = 7{,}9 \cdot 10^{-3}\ \rho (h\omega)^2. \tag{26}$$

Здесь необходимо отметить следующее чрезвычайно важное обстоятельство: устойчивость плит нужно рассчитывать с учетом того факта, что амплитуда пуль-



Фиг. 67. Исследования устойчивости плиток. Зависимости

$$\psi = \varphi\left(\frac{l}{H}\right) \text{ и } K = f\left(\frac{l}{H}\right);$$

1 — бурное течение; *2* — спокойное течение; *3* — затопленный прыжок; *4* — отогнанный прыжок; *n* — число опытов.

сационного давления непрерывно меняется и время от времени может достигать величины, в несколько раз большей среднего значения. Опыты проф. М. А. Великанова показали, что отклонения отдельных пульсационных скоростей от средней пульсационной скорости подчиняются нормальному гауссовскому закону. Есть основания предполагать, что этому же закону подчиняются и амплитуды давления; во всяком случае чем больше отклонение отдельной амплитуды давления от среднего значения, тем меньше вероятность появления такой амплитуды. Таким образом нужно учитывать возможность появления амплитуды P, в λ раз превосходящей среднее значение, т. е. полагать:

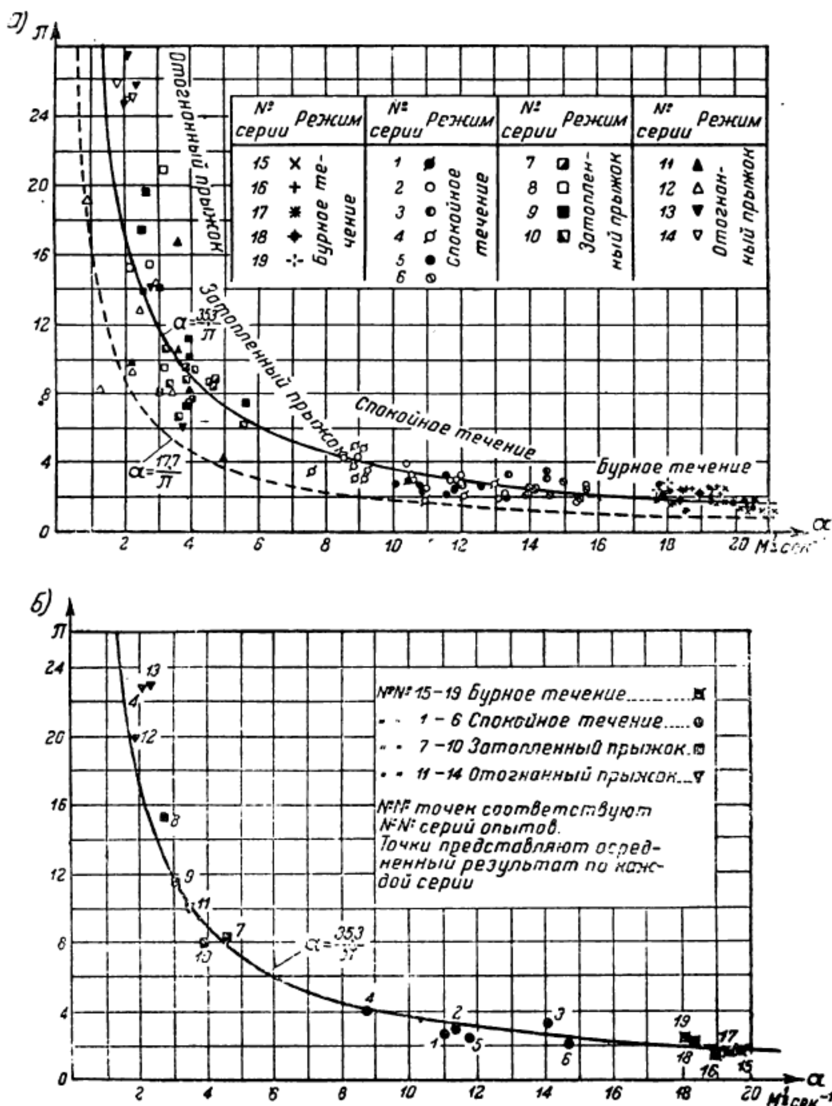
$$P = \lambda \cdot P_{cp}.$$

Чем бо̀льшую гарантию устойчивости крепления желательно иметь, тем большим должен назначаться коэфициент λ. Разброс точек графика фиг. 68, *а* дает представление о минимальной величине λ. Действительно, на этом графике кроме основной гиперболы проведена пунктиром гипербола с параметром K, в два раза меньшим ($K=17{,}7$). Здесь мы видим, что все точки за исключением

одной ($\alpha = 1,3$; $\Pi = 8,2$) расположились выше этой гиперболы. Отсюда нетрудно вывести, что

$$(\gamma_1 - \gamma)\,\delta < 4\psi\rho\,(h\,\omega)^2,$$

т. е. во всех проведенных (за исключением одного) опытах амплитуда пульсационного давления не превосходила среднего значения P_{cp} больше, чем в четыре раза.



Фиг. 68. Исследования устойчивости плиток. Зависимость $\alpha = f(\Pi)$;
а — результаты 136 опытов; *б* — осредненные значения опытных точек.

Увеличивая численный коэфициент формулы (26) в $\lambda = 4$ раза, получаем следующее выражение для максимальной, время от времени появляющейся амплитуды:

$$P_{max} = 0,032\,\rho\,(h\,\omega)^2. \qquad (27)$$

Вполне понятно, что изредка могут появляться еще бо́льшие амплитуды, причем вероятность их появления тем меньше, чем больше их величина.

Формула (26) дает возможность определить амплитуду средней вырывающей вертикальной силы, когда известны глубина потока h и угловая скорость донных вихрей, т. е. средний (в пределах толщины донного вихря) градиент скорости по вертикали. Глубина потока как расчетная величина всегда известна; величина же градиента $\omega = \frac{dv}{dy}$ зависит от многих факторов, например от режима потока (истечение из-под щита, бурное или спокойное течение).

Не останавливаясь на вопросе о нахождении величины угловой скорости ω в функции всех величин, ее определяющих, мы в настоящей работе ограничились установлением основной зависимости между пульсационным давлением и величинами, непосредственно его определяющими, а именно — угловой скоростью и прочими факторами (например поступательной скоростью потока). Что касается вопроса определения величины угловой скорости ω в функции от всех определяющих ее величин, то эта задача является чрезвычайно широкой и интересной проблемой о распределении в различных случаях скоростей по вертикали. Решение этой задачи выходит за рамки настоящего исследования[1].

ГЛАВА VI

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ФИЛЬТРАЦИИ СООРУЖЕНИЙ

Для определения сил фильтрационного потока и разработки основных противофильтрационных мероприятий, а также мероприятий, направленных к уменьшению фильтрационного давления и следовательно к облегчению всей конструкции сооружения, все основные бетонные и земляные сооружения канала Москва — Волга были подвергнуты специальным исследованиям по фильтрации.

Эти исследования производились в основном по методу электрогидродинамической аналогии на приборах с применением жидкостных проводников, разработанных и сконструированных впервые в лаборатории строительства. В результате отказа от применения прибора ЭГДА с станиолевыми пластинками и перехода на жидкостные проводники была выработана новая методика экспериментирования и анализов получаемых материалов. При исследовании земляных сооружений пользовались также и фильтрационными лотками[2].

1. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ФИЛЬТРАЦИИ

Основным и существенным недостатком прибора ЭГДА, имевшегося в распоряжении гидротехнической лаборатории Строительства канала Москва—Волга к моменту проведения экспериментальных исследований по фильтрации, являлась невозможность моделирования с помощью станиолевых пластинок, применявшихся в приборе, неоднородности грунта основания. Поэтому для решения конкретных задач на фильтрацию под сооружениями канала лаборатория Строительства вынуждена была искать новые пути решения этих вопросов.

К этому времени в советской и иностранной литературе уже появились указания на применение электролитов (растворов соли) в качестве проводника тока для электрической модели. Однако такая замена значительно уменьшала чувствительность прибора, так как эти электролиты требовали употребления переменного тока и телефонных наушников, с помощью которых определение эквипотенциалей производилось грубо по затуханию звука. Попытка заменить наушники гальванометром с выпрямителем (что значительно улучшило бы чувствительность прибора) не увенчалась успехом, так как возникновение в растворе поляризационных явлений сильно искажало показания гальванометра. Этот недостаток удалось устранить, когда по предложению сотрудника лаборатории Строитель-

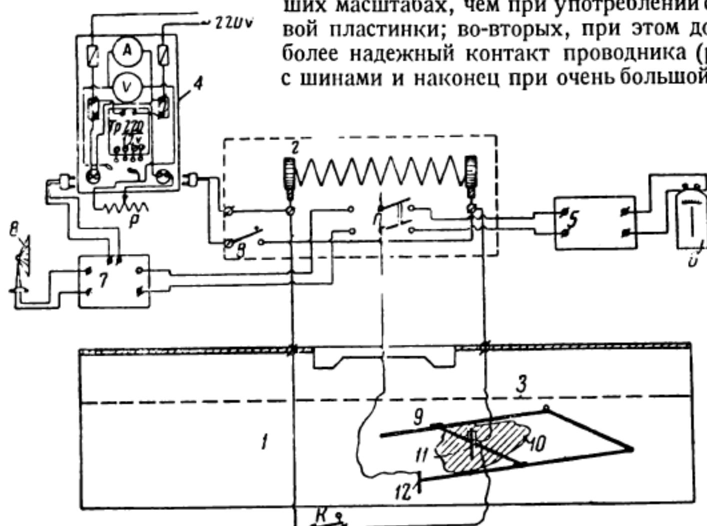
[1] В настоящее время вопрос об устойчивости облицовочных плит в потоке воды инж. Ю. Д. Городковым значительно расширен и доработан.

[2] Работы проводились под руководством Т. М. Василишина.

ства инж. Т. М. Василишина в качестве электрического проводника был взят раствор медного купороса ($CuSO_4$) и медные электроды (шины).

При пользовании раствором медного купороса ($CuSO_4$) при прохождении через него электрического тока $CuSO_4$ разлагается на катион Cu и анион SO_4. Пропорционально этому идет перемещение Cu с анода в раствор, благодаря чему концентрация $CuSO_4$ остается неизменной и следовательно не изменяется его электропроводность, а электроды не испытывают явления поляризации.

Решение этого весьма существенного вопроса позволило отказаться от употребления станиолевой пластинки и других аналогичных ей материалов (например графита) в качестве электрического проводника и перейти к раствору медного купороса, что дало большие преимущества новому прибору: во-первых, можно было изготовлять модели в гораздо больших масштабах, чем при употреблении станиолевой пластинки; во-вторых, при этом достигался более надежный контакт проводника (раствора) с шинами и наконец при очень большой чувствительности прибора устранялись поляризационные явления при пользовании гальванометром с выпрямителем. В связи с этим в лаборатории был запроектирован и изготовлен прибор ЭГДА с жидкими проводниками (раствором медного купороса). Питание прибора переменным электрическим током проводилось от электрической сети с понижением напряжения до 8—12 *в*.



Фиг. 69. Общая схема установки ЭГДА с жидкими проводниками для изучения фильтрации в неоднородной среде:

1 — модель; *2* — реохорд; *3* — раздельно-контактная стенка, служащая перегородкой и передатчиком потенциала из одного раствора в другой; *4* — щит; *5* — выпрямитель; *6* — гальванометр; *7* — усилитель; *8* — репродуктор; *9* — пантограф; *10* — бумага; *11* — карандаш; *12* — игла

Схема этого прибора приведена на фиг. 69.

При помощи этой установки можно было перейти на исследование фильтрации гидротехнических сооружений с учетом геологических условий основания (разнородность грунтов), т. е. в полном соответствии с натурой, при достаточно простой технике моделирования, легко осуществимой в условиях строительства.

Принцип моделирования разных фильтрационных зон геологического профиля основан на следующем. Как известно, форма и расположение линий равных напоров не зависят от абсолютного значения коэфициента фильтрующего грунта. Следовательно при наличии в основании слоев грунтов с разными коэфициентами фильтрации достаточно сохранить при моделировании только их соотношение. Так например, для трех слоев, коэфициенты фильтрации которых:

$$K_1 > K_2 > K_3,$$

по аналогии должно быть соблюдено условие:

$$C_1 : C_2 : C_3 = K_1 : K_2 : K_3, \tag{28}$$

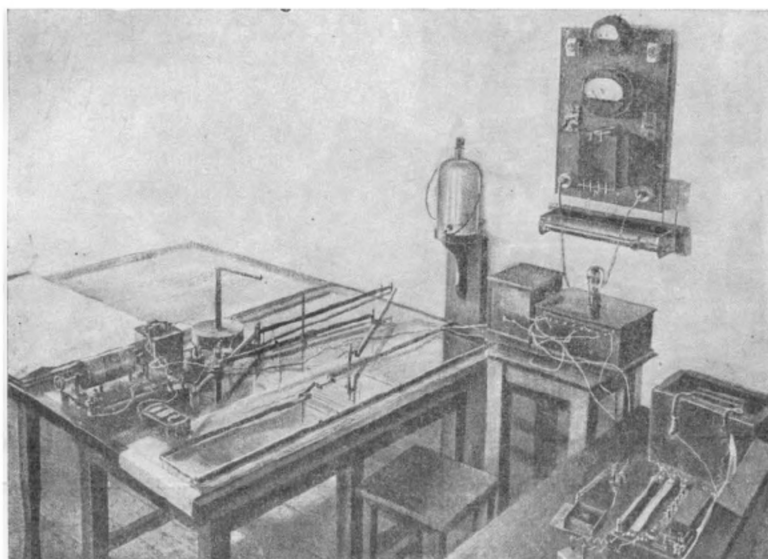
$$\frac{1}{\rho_1} : \frac{1}{\rho_2} : \frac{1}{\rho_3} = K_1 : K_2 : K_3,$$

причем

$$\rho_1 < \rho_2 < \rho_3.$$

Здесь C_1, C_2, C_3 — удельная электропроводность проводника; ρ_1, ρ_2, ρ_3 — удельное сопротивление проводника.

Ясно, что если подобрать по формуле (28) проводники, соответствующие коэфициентам фильтрации разных слоев грунта основания сооружения, и при помощи этих проводников в соответствующем масштабе смоделировать слои



Фиг. 70. Общий вид установки ЭГДА с жидкими проводниками

грунта, то при помощи прибора ЭГДА получим картину движения грунтового потока в разнородной среде, соответствующую натуре. Задаваясь разной концентрацией раствора, можно получать и разную его электропроводность, необходимую для моделирования соответствующих коэфициентов фильтрации. Употребление в качестве электрического проводника раствора медного купороса позволило производить очень точные измерения и моделировать коэфициенты фильтрации, отличающиеся между собой в 2 000 раз и больше.

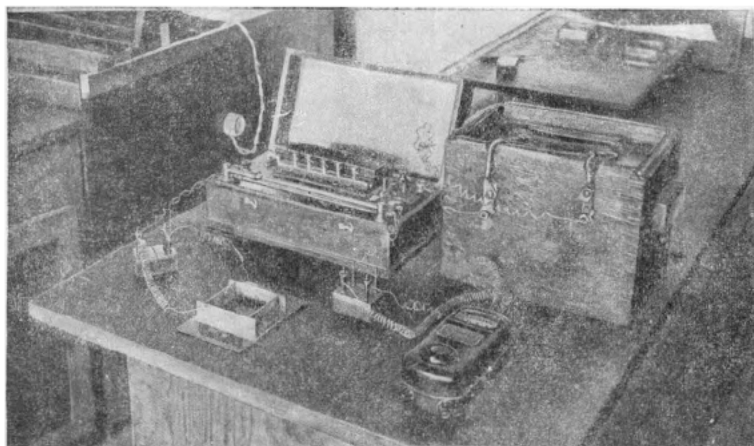
Для удобства подбора раствора разной электропроводности произведена тарировка растворов разной концентрации и построены кривые зависимости удельного сопротивления раствора $CuSO_4$ от процентного его содержания.

Необходимо отметить, что для раствора нужно брать чистую дестиллированную воду.

Чтобы растворы разной удельной электропроводности при моделировании геологических условий не смешивались, их разделяют так называемыми раздельно-контактными стенками, которые, с одной стороны, должны изолировать соседние растворы во избежание их смешения, а с другой — служить передатчиками потенциала из одной среды в другую.

Эти стенки изготовлялись из целлулоидной или эбонитовой пластины толщиной от 0,5—1,0 *мм*; через каждые 1—2 *мм* на них надеты кольцом медные полоски шириной 1—2 *мм* и толщиной 0,25 *мм*. Так как удельное сопротивление меди по сравнению с сопротивлением употребляемого раствора ничтожно, то для электрического поля раздельно-контактная стенка в растворе практически не существует. В этом легко убедиться, если произвести опыт с однородным раствором в модели при наличии раздельно-контактной стенки и при ее отсутствии. Если картина потока в обоих случаях будет одинаковая, то это означает, что наличие раздельно-контактной стенки не вносит никакого искажения. Такую поверку желательно делать перед каждым исследованием сооружения.

На фиг. 70 показан общий вид установки, на которой видна модель насосной станции. На фиг. 71 изображена тарировочная установка для определения электропроводности раствора.



Фиг. 71. Общий вид тарировочной установки для определения электропроводности раствора

Для фиксации опытного материала, т. е. для нанесения на чертеж получаемых точек эквипотенциалей, был применен, как это сделано в Государственном Гидрологическом Институте в Ленинграде, специально приспособленный для этих целей пантограф.

Расходы определялись по формуле (29):

$$q = \frac{k_n H}{R_n}, \tag{29}$$

где H — действующий напор;

k_n — один из коэфициентов фильтрации грунта основания;

R_n — отвлеченное число, определяемое методом ЭГДА при помощи так называемого стандарта.

Исследуя вышеописанным методом подземные контуры всех сооружений канала, представилось возможным дать уточненную картину фильтрационного потока в основаниях сооружений в зависимости от геологических условий, улучшить (в фильтрационном отношении) очертание подземного контура и значительно уменьшить строительные объемы (сократить длины понуров, фильтров и др.), что и осуществлено при постройке.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ФИЛЬТРАЦИИ ПОД ОСНОВАНИЯМИ СООРУЖЕНИЙ КАНАЛА

Из всех сооружений канала, подвергнутых исследованиям на фильтрацию, остановимся лишь на наиболее характерных.

а) Бетонная плотина № 11

Исследования были произведены по методу ЭГДА (плоская задача) и сводились к установлению распределения фильтрационных давлений по водонепроницаемой части подземного контура плотины, начиная от понура и кончая водобойным колодцем.

В зависимости от условий входа потока в основание сооружения в верхнем бьефе были проведены два цикла опытов:

Цикл А. Коэфициенты фильтрации понура и нижней морены, на которой расположено сооружение, были приняты одинаковыми, благодаря чему линия входа потока начиналась непосредственно у сооружения и кроме того поток через скважину, находящуюся на расстоянии 75 *м* от оси плотины, имел контакт с водоносным песчаным слоем, перекрытым мореной.

Цикл В. Кроме условий поступления потока, упомянутых в цикле А, поток проходил еще через щель, образовавшуюся у верховой вертикальной грани.

В зависимости от условий выхода фильтрационного потока в нижний бьеф были произведены три серии опытов:

Серия а. Поток поступает в дренаж.

Серия b. Поток поступает в дренаж и в разгрузочную скважину, находящуюся в нижнем бьефе на расстоянии $S=500$ *м* от оси плотины и доведенную до поверхности юрских глин.

Серия с. Поток поступает в дренаж и в разгрузочную скважину, находящуюся в нижнем бьефе на расстоянии $S=250$ *м* от оси плотины и доведенную до поверхности юрских глин.

Для грунтов основания были приняты следующие коэфициенты фильтрации: для подморенных песков $k=0{,}001A$ *см/сек*, для нижней морены $k=0{,}000001A$ *см/сек*. Дополнительно к этому коэфициенту фильтрации для морены под флютбетом принимались $k=0{,}0001A$ *см/сек* и $k=0{,}001A$ *см/сек* при неизменяющихся коэфициентах фильтрации в остальной части основания.

Приводим данные некоторых опытов (фиг. 72).

Результаты проведенных опытов позволяют сделать следующие выводы:

1. Скважина в нижнем бьефе дает снижение фильтрационных напоров под флютбетом плотины. Это снижение доходит до 10% при расстоянии скважины $S=500$ *м* от оси плотины и до 20% — при расстоянии $S=250$ *м*. Такое влияние скважины сказывается как при целом понуре (цикл *А*), так и при понуре, разорванном у начала флютбета (цикл *В*).

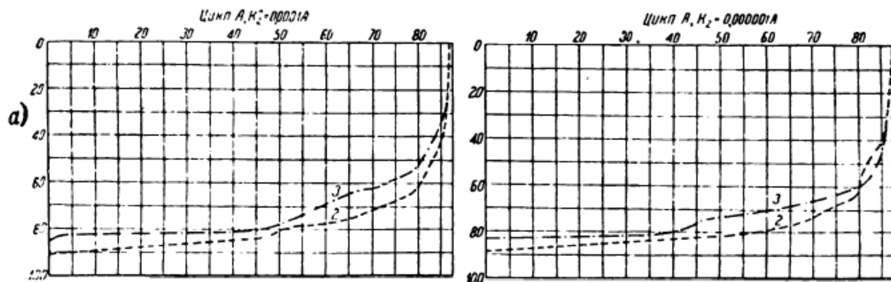
2. Изменение коэфициента фильтрации грунта непосредственно под флютбетом не оказывает существенного влияния на распределение фильтрационных токов по подземному контуру фундамента.

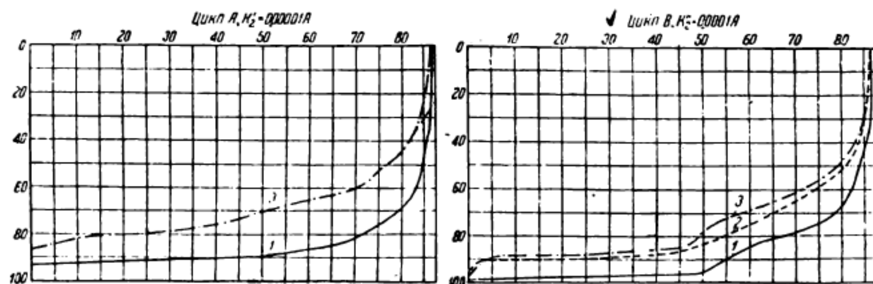
3. Появление щели в понуре вызывает повышение фильтрационных напоров под флютбетом на 3—8%.

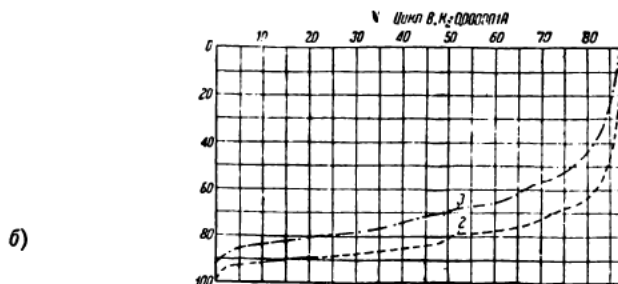
4. Фильтрационные напоры на границе между флютбетом и первым водобоем плотины представлены в табл. 17, кратко обрисовывающей как влияние щели в понуре, так и влияние разгрузочной скважины в нижнем бьефе.

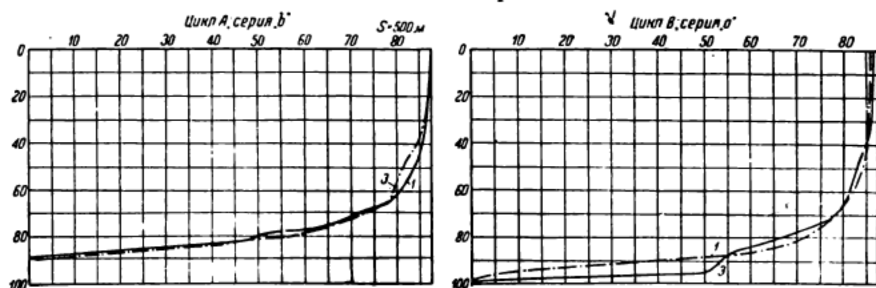
Таблица 17

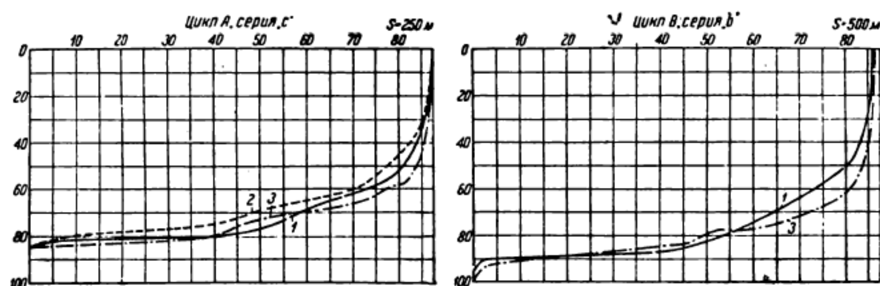
Серии опытов \ Циклы опытов	*A*	*B*	Примечание
a	88%	93%	Цифры в графах *A* и *B* дают значения фильтрационных напоров в процентах от *H* на границе между флютбетом и водобоем
b	82%	84%	
c	74%	81%	

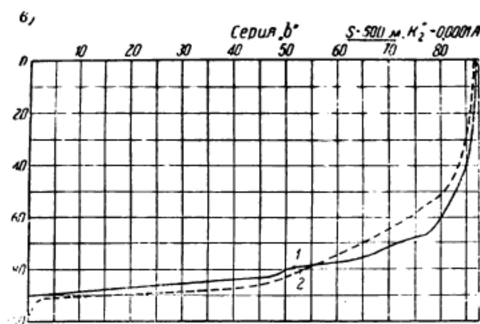

а)
Цикл А, K_2=0,0001A
Цикл А, K_2=0,000001A
10 20 30 40 50 60 70 80
0 20 40 60 80 100
2
3

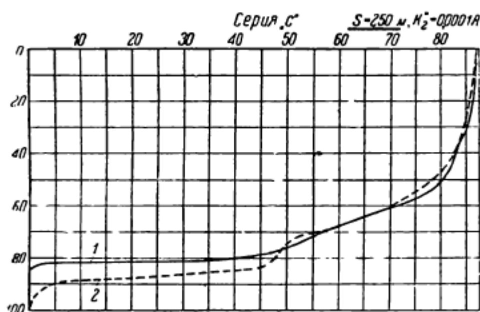

Цикл А, K_2=0,00001A
Цикл В, K_2=0,0001A
10 20 30 40 50 60 70 80
0 20 40 60 80 100
1
2
3

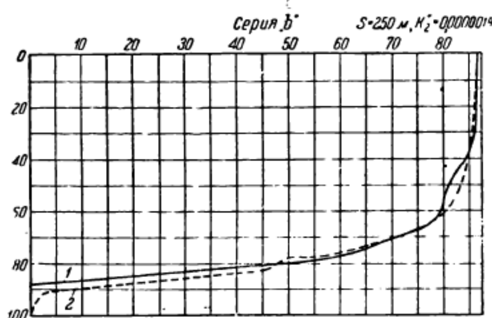

б)
Цикл В, K_2=0,000001A
10 20 30 40 50 60 70 80
0 20 40 60 80 100
2
3


Цикл А, серия „b"
S=500 м
Цикл В, серия „a"
10 20 30 40 50 60 70 80
0 20 40 60 80 100
1
3


Цикл А, серия „c"
S=250 м
Цикл В, серия „b"
S=500 м
10 20 30 40 50 60 70 80
0 20 40 60 80 100
1
2
3







Фиг. 72. Исследование фильтрации в основании бетонной плотины № 11. Эпюры фильтрационных напоров:

а — влияние расстояния разгрузочной скважины в нижнем бьефе на распределение фильтрационного напора: при различных коэфициентах фильтрации грунта под флютбетом: *1* — фильтрационный поток поступает в дренаж без разгрузочной скважины в нижнем бьефе; *2* — то же, но с разгрузочной скважиной на расстоянии $S = 500$ *м*; *3* — то же, но с разгрузочной скважиной на расстоянии $S = 250$ *м*; цикл *А* — щель в понуре отсутствует; цикл *В* — щель в понуре имеется;

б — влияние различных коэфициентов фильтрации под флютбетом на распределение фильтрационного напора при различном расстоянии разгрузочной скважины в нижнем бьефе: *1* — коэфициент фильтрации под флютбетом $K_2'' = 0{,}0001\ A$, *2* — то же $K_2' = 0{,}00001\ A$, $K_2 = 0{,}000001\ A$;

в — влияние щели в понуре у основания сооружения на распределение фильтрационного напора при различном расстоянии разгрузочной скважины в нижнем бьефе и разных коэфициентах фильтрации: *1* — щель в понуре отсутствует (цикл *А*); *2* — щель в понуре имеется (цикл *В*).

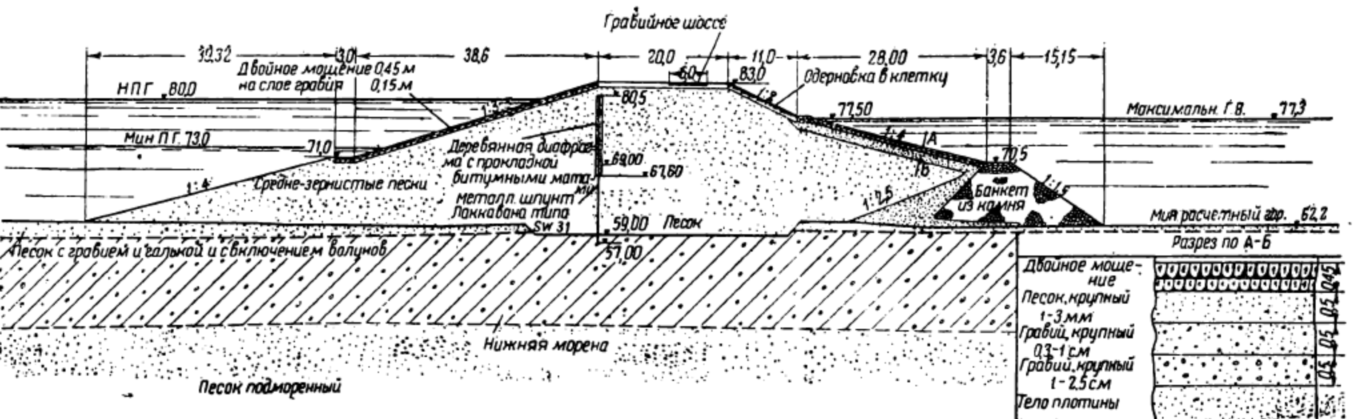
Примечание. Числа по оси абсцисс показывают расстояние в метрах соответствующих точек подземного контура сооружения от верховой вертикальной грани флютбета; числа по оси ординат — процент от полного действующего напора.

5. Фильтрационный поток при поступлении его в дренаж под первым водобоем будет иметь скорость при очень больших градиентах (теоретически бесконечно большие), что требует устройства хорошо работающего обратного фильтра или же удлинения зуба в конце флютбета.

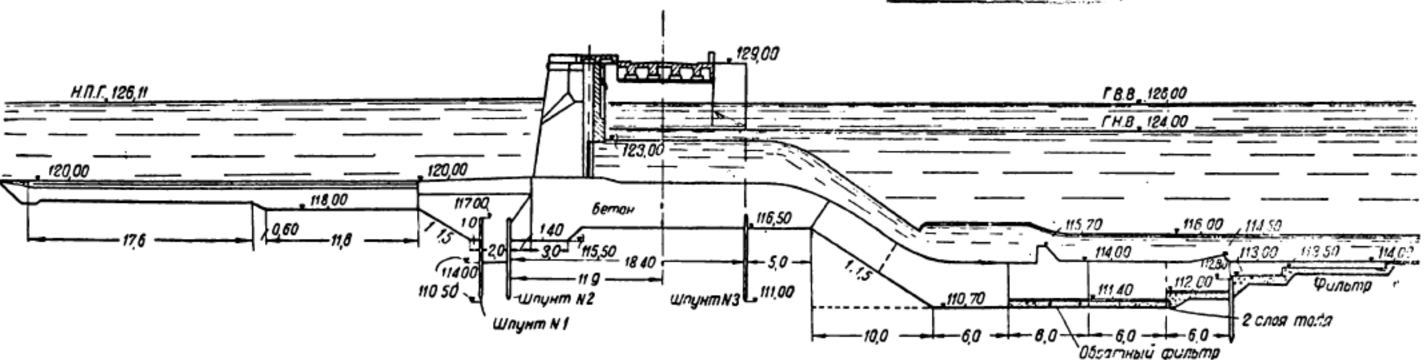
В результате проведенных исследований в окончательном проекте земляной плотины № 6 была принята конструкция, приведенная на фиг. 73.

б) Водосброс при плотине № 7 (двухстороннего напора)

Основание сооружения состоит из мелкозернистых песков с примесью гравия и гальки, а также глинистых песков. При исследованиях было принято, что грунт однороден и залегает на большую глубину. Одновременно предположено, что фильтрационный поток имеет свободный выход в дренаж, состоящий из достаточно водопроницаемого материала, не дающего потерь напора (фиг. 74).



Фиг. 73. Поперечный разрез земляной плотины № 6 (окончательный вариант)



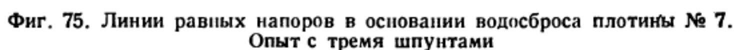
Фиг. 74. Продольный разрез по оси бетонного водосброса земляной плотины № 7

Было проведено пять опытов, что дало возможность в полной мере выяснить влияние шпунтов на гашение фильтрационных напоров:

Опыт № 1 — случай, когда шпунты отсутствуют.

Опыт № 2 — случай, когда в конце понура имеются два шпунта на расстоянии 2 *м* друг от друга.

Опыт № 3 — проектное очертание подземного контура (три шпунта).

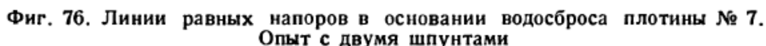


Фиг. 75. Линии равных напоров в основании водосброса плотины № 7. Опыт с тремя шпунтами

Опыт № 4 — отсутствует шпунт № 3 и непосредственно перед фильтром имеется зуб.

Опыт № 5 — повторение опыта № 4, но при наличии шпунта № 3.

Результаты проведенных опытов, приведенные на фиг. 75 и 76, позволяют судить о влиянии шпунтов на изменение напоров, взвешивающего давления, а также выходных скоростей. Сравнение значений фильтрационных напоров в точке непосредственно за вторым шпунтом показало, что влияние шпунтов на эти напоры незначительно.



Фиг. 76. Линии равных напоров в основании водосброса плотины № 7. Опыт с двумя шпунтами

При наличии двух шпунтов в конце понура в точке за вторым шпунтом фильтрационный напор $H_ф$ уменьшался на 0,04 H; при наличии трех шпунтов (по проекту) фильтрационный напор уменьшался на 0,03 H, а при наличии зуба — всего на 0,02 H по сравнению с таковым же без шпунтов.

Фиг. 77. Продольный разрез бетонного водосброса земляной плотины № 2 (I расчетный случай — выход в конце гасителя, фильтр не работает; II случай — выход в начале гасителя, фильтр работает)

Коэфициент запаса против вымыва:

$$\alpha = \frac{J_{кр}}{J} = \frac{3,3}{1,2} = 2,75,$$

где $J_{кр}$ — критический градиент, определенный в зависимости от рода пригрузки основания со стороны нижнего бьефа (дренаж, отмостка и др.), и J — градиент, полученный из опыта (опыты № 4 и 5).

Полученная величина позволяет считать, что вымыва грунта из-под сооружения происходить не будет.

Как общий вывод из проведенных опытов, можно отметить, что с точки зрения гашения фильтрационного напора шпунты в данной конструкции являются малоэффективными[1]. Поэтому лаборатория считала, что если по конструктивным соображениям устройство двух парных шпунтов является целесообразным, то их можно оставить; что же касается третьего шпунта, то если с конструктивной стороны нет надобности в его устройстве, целесообразно от него отказаться, заменив его зубом.

в) Водосброс при земляной плотине № 2

Основание сооружения состоит главным образом из разнозернистых песков с примесью гравия и гальки; местами имеется глинистый песок; встречаются небольшие прослойки суглинков и глины.

В опытах грунт был принят однородным по своим фильтрационным свойствам и залегающим на большую глубину. Всего было произведено 6 опытов, из которых три для эксплоатационного случая и три — для ремонтного.

1) Э к с п л о а т а ц и о н н ы й с л у ч а й

Горизонт верхнего бьефа — 122,00, нижнего бьефа — 117,25.

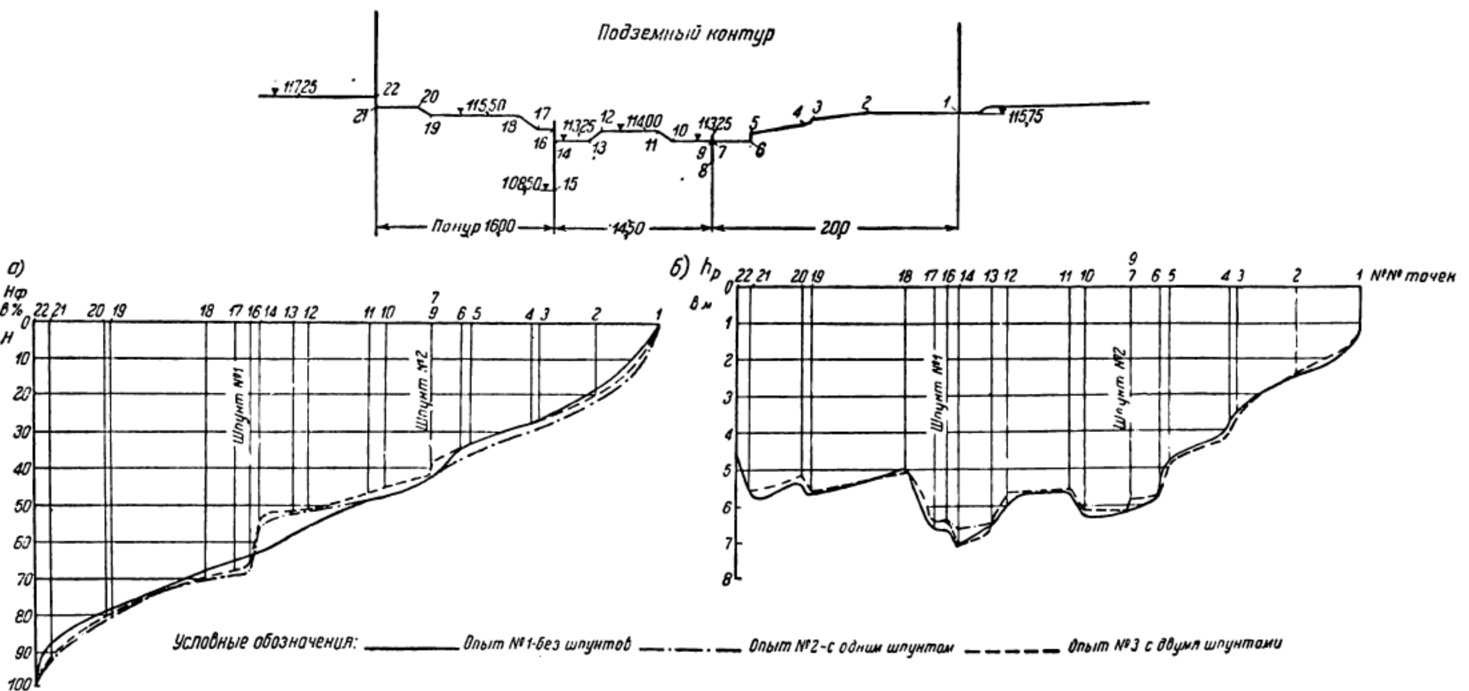
Расчетная длина понура $L = 16,0$ *м* от верхнего шпунта. Выход фильтрационных вод — в конце гасителя (фиг. 77).

Опыт № 1 — без шпунтов.

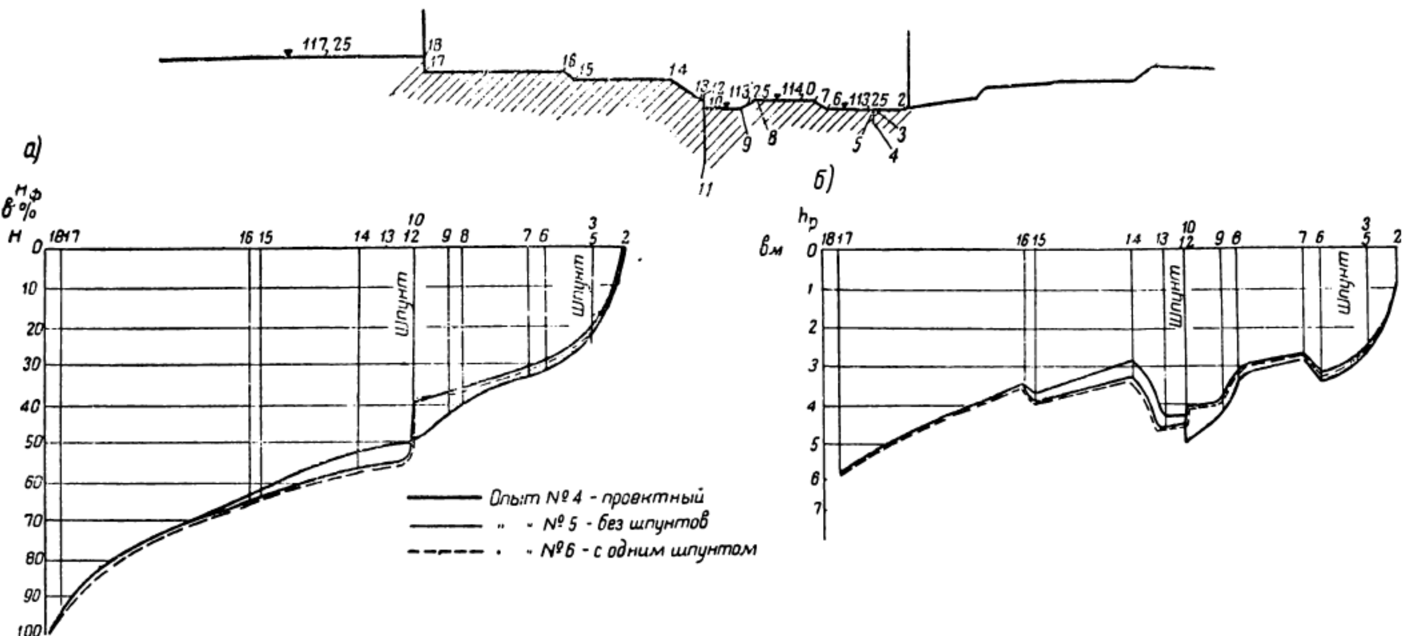
Опыт № 2 — со шпунтом № 1.

Опыт № 3 — с двумя шпунтами № 1 и 2.

[1] Это видно даже из чертежа водосброса: длина шпунтов весьма невелика по сравнению с длиной горизонтальных частей подземного контура. *Редколлегия.*



Фиг. 78. Испытани фильтрации подземного контура бетонного водосброса земляной плотины № 2 (контуры шпунтов не развернуты): *а* — эпюры фильтрационного напора; *б* — эпюры противодавления



иг. 79. Испытание фильтрации в основании бетонного водосброса плотины № 2 — ремонтный случай (контуры шпунтов не развернуты)
а — эпюры фильтрационного напора; *б* — эпюры противодавления

2) Ремонтный случай

Горизонт верхнего бьефа — 122,40, нижнего бьефа — 114,00.

Расчетная длина понура $L=24$ *м* от верхового шпунта.

Выход фильтрационных вод — в начале гасителя.

Опыт № 4 — без шпунтов.

Опыт № 5 — со шпунтом № 1.

Опыт № 6 — с двумя шпунтами № 1 и 2.

Полученные опытом значения фильтрационных напоров H и вычисленные значения противодавлений h_p приведены в виде эпюр на фиг. 78, 79.

Из рассмотрения этих материалов видно, что, как и для рассмотренного нами выше случая водосброса при плотине № 7, влияние шпунтов на эпюрах фильтрационных напоров и эпюрах противодавлений сказывается весьма незначительно.

3. ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЛЬТРАЦИИ ЗЕМЛЯНЫХ ПЛОТИН И ДАМБ

Исследования фильтрации земляных плотин и дамб в гидротехнической лаборатории Строительства канала Москва—Волга проводились с целью определения наиболее рационального и устойчивого профиля этих сооружений. Для этой цели при испытаниях и расчетах определялись: положение кривой депрессии, фильтрационный расход, выходные скорости и велись наблюдения за состоянием модели; тщательно изучалась также эффективность экранов и понуров.

Лабораторным исследованиям на фильтрацию подвергались земляные плотины № 2, 3 и 5. Результаты, полученные исследованием этих плотин, служили основой для проектирования других плотин Строительства.

Наиболее детально было произведено исследование земляной плотины № 2.

Ниже приводятся основные результаты проведенных гидротехнической лабораторией Строительства экспериментальных исследований земляных плотин № 2 и 3, а также метод расчета земляных плотин на непроницаемом основании, разработанный, исходя из анализа всего полученного в лаборатории Строительства экспериментального и имеющегося в технической литературе материала. Необходимость разработки такого метода расчета диктовалась недостаточным совершенством имевшейся к тому времени теории.

а) Лабораторные исследования земляных плотин канала на фильтрацию

Земляная плотина № 2

В результате проведенных опытов [1] были получены кривые депрессии для исследуемого профиля плотины, представленные на фиг. 80.

Рассматривая пучок кривых депрессий при разных длинах понура, можно констатировать, что увеличение длины понура закономерно понижает кривые депрессии в теле плотины, причем последние сходятся почти в одной точке у обратного фильтра, имея разные выходные градиенты.

Полученные удельные расходы (на 1 *пог. м* длины плотины) через тело и основания плотины характеризуются следующими показателями (табл. 18).

Таблица 18

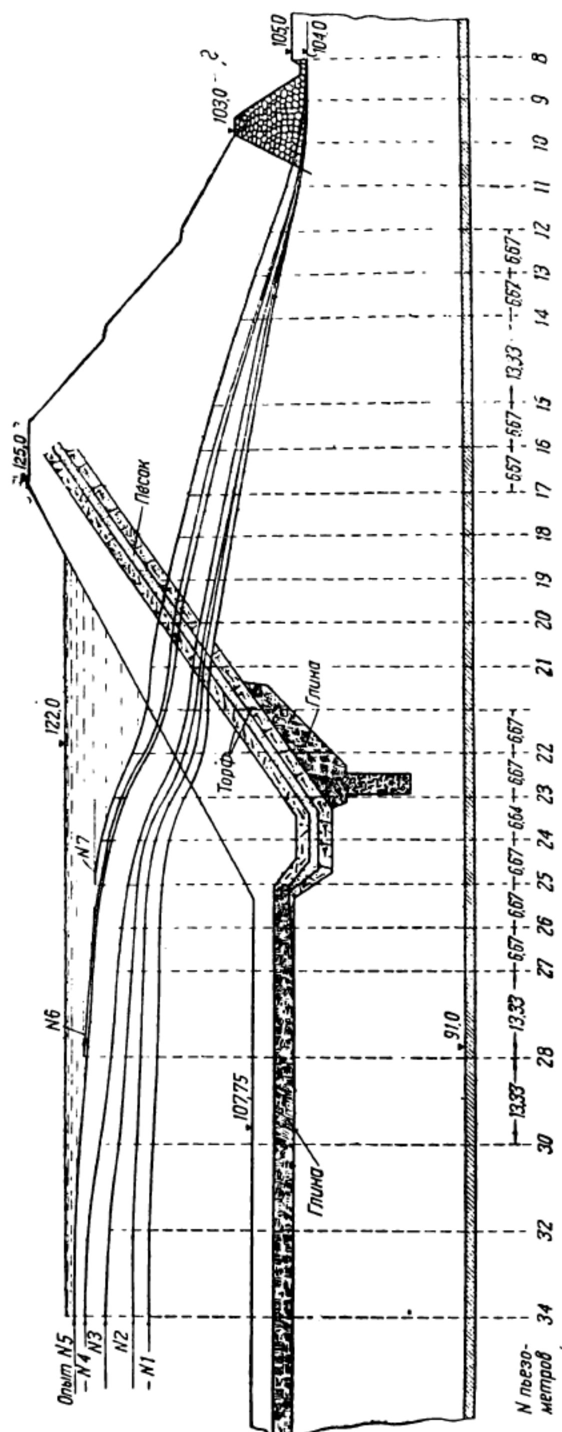
№ опытов	Длина понура в *м*	Удельные расходы в *л/сек*
1	Бесконечная	0,13 — 0,15
2	161,0	0,15 — 0,17 — 0,22
5	65,0 [2]	0,23 — 0,29 — 0,31
6	25,0	0,24 — 0,34
7	0,0	0,31 — 0,45

[2] Трещина в понуре на расстоянии 25,0 *м* от низовой грани напорного откоса.

Примечание. Ввиду разных суффозионных явлений расходы во время опытов не были постоянными.

На основании этих данных можно также констатировать, что величины фильтрационных расходов понижаются с удлинением понура. В табл. 19 приведены полученные пьезометрические

[1] Исследования проводились в плоском фильтрационном лотке. Методика исследований и аппаратура были приняты обычные для подобного рода исследований, почему они здесь и не описываются.



Фиг. 80. Депрессионные кривые земляной плотины № 2 Г. В. Б = 122,0

уклоны (градиенты) и скорости фильтрации перед выходом потока в антифильтр дренажной призмы.

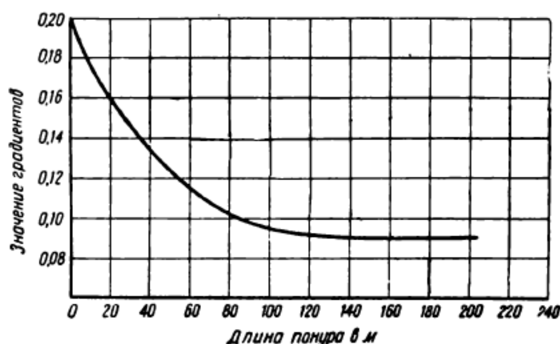
Таблица 19

№ опытов	Длина понура в *м*	№ пьезометров	Градиент	Средняя скорость в *см/сек*	Скорость в порах грунта в *см/сек* *u*	Общая длина пути фильтрации, выраженная в напорах[1] от *H*
I	Бесконечная	11—12	0,09	0,0011	0,0033	—
II	61,0	11—12	0,09	0,0011	0,0033	15,79
III	100,0	11—12	0,097	0,0011	0,0033	13,4
IV	65,0	11—12	0,11	0,0014	0,0043	10,45
V	65 с трещиной в понуре [2] . . .	11—12	0,14	0,0018	0,0055	8,23
	25,0	11—12	0,15	0,0019	0,0058	8,33
VI	0,0	11—12	0,20	0,0026	0,0073	6,34
VII						

[1] Длина пути фильтрации была подсчитана как расстояние от начала половины дренажной призмы до конца понура.

[2] Трещина в понуре на расстоянии 25,0 *м* от низовой грани напорного откоса была воспроизведена в виде сквозной щели в понуре 0,66 *м* на всю ширину лотка (0,55 *м*).

Как видно из этой таблицы и фиг. 81, уклоны (градиенты) кривой депрессии перед входом ее в дренажную призму определялись в пределах от 0,09 до 0,20, что соответствует средним скоростям от $v=0{,}001$ до $v=0{,}0026$ *см/сек* или от $u=0{,}0033$ до $u=0{,}0073$ *см/сек*.



Фиг. 81. График изменения выходных градиентов при разных длинах понуров

Чтобы установить, насколько безопасны полученные скорости в смысле выноса частиц грунта из тела земляных плотин, ниже приводятся данные Тима и Победоносцева о величинах опасных фильтрационных скоростей при различных диаметрах зерен грунта (табл. 20).

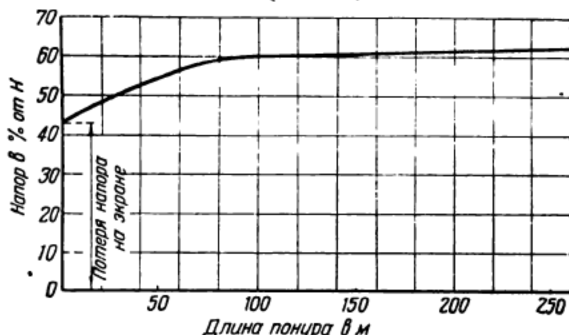
Таблица 20

Диаметр зерен грунта в *мм*	0,001	0,005	0,015	0,015	0,02	0,05	0,10
Опасная фильтрационная скорость воды в *см/сек*	0,001	0,01	0,03	0,05	0,06	0,3	0,8
Диаметр зерен грунта в *мм*	0,15	0,20	0,25	0,50	1,00	2,00	3,00
Опасная фильтрационная скорость воды в *см/сек*	1,5	2,5	3,2	7,2	10,3	17,5	82,2

Судя по данным этой таблицы, полученные в опытах скорости фильтрации способны вымывать частицы грунта, относящиеся к фракциям порядка 0,005 *мм* и менее, каковых в теле плотины по данным анализов имеется около 1%.

Для теоретического определения выходных скоростей грунтового потока в основании плотины непосредственно за дренажной призмой лаборатория считала возможным применять расчетную формулу для непроницаемого флютбета. В последнем случае, применяя формулу акад. Павловского[1], получаем:

$$J = \frac{1}{\pi b} \cdot \frac{H}{\sqrt{\left(\frac{b + l_1}{b}\right)^2 - 1}}, \tag{30}$$



Фиг. 82. График потери напора на экране и понуре

где J — значение градиента в месте выхода фильтрационного потока непосредственно за дренажной призмой;

H — действующий напор;

l_1 — длина дренажной призмы с антифильтром;

b — половина длины водонепроницаемого контура флютбета.

Вычисленные градиенты J для различных длин понура сведены в табл. 21.

Таблица 21

Длина понура в *м*	Длина плотины по основанию в *м*	Длина пути фильтрации в *м*	Градиент в точке выхода фильтрационного потока	Длина понура в *м*	Длина плотины по основанию в *м*	Длина пути фильтрации в *м*	Градиент в точке выхода фильтрационного потока
0	111,20	111,20	0,121	175	111,20	286,20	0,084
25	111,20	126,20	0,118	200	111,20	311,20	0,080
50	111,20	161,20	0,109	250	111,20	361,20	0,075
75	111,20	176,20	0,102	300	111,20	411,20	0,071
100	111,20	211,20	0,097	400	111,20	511,20	0,064
125	111,20	225,20	0,092	500	111,20	611,20	0,058
150	111,20	261,20	0,087	—	—	—	—

Для условия плотины № 2 критический градиент по Терцаги был принят равным:

$$J_{кр} = (1 - p)(\gamma - 1) = (1 - 0,33) \cdot (2,55 - 1) = 1,04 \approx 1,$$

где p — порозность грунта в долях единицы, равная 0,33;

γ — удельный вес грунта, равный 2,55.

Сопоставляя принятый критический градиент с расчетными величинами градиента J, видно, что последние значения во всех случаях не достигают величины первого, и даже для случая без понура:

$$\frac{j_{кр}}{j} = \frac{1,0}{0,13} = 7,7 \approx 8,$$

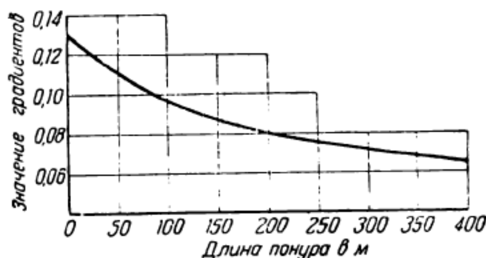
[1] Проф. Павловский Н. Н., Теория движения грунтовых вод под гидротехническими сооружениями. Ленинград 1922.

т. е. мы имеем почти восьмикратный запас в смысле выпора грунта в самом опасном месте плотины.

Для определения влияния на фильтрацию в теле и основании плотины торфяного экрана с глиняным шпунтовым зубом и наличия трещины в экране были определены для каждого случая потери напора по отношению к начальной точке кривой депрессии в теле плотины непосредственно за экраном. Результаты подсчетов сведены в табл. 22, на основании которой построена кривая потерь фильтрационных напоров в зависимости от длины понура (фиг. 82).

Таблица 22

№ опытов	Длина понура в *м*	Потери напора на понуре и экране с зубом в % от *H*
VII	Без понура	43,0
VI	25	49,0
V	65 с трещиной в понуре	51,0
IV	65	57,0
III	100	60,0
II	161	61,0
I	Бесконечно-длинный понур	62,0



Фиг. 83. График изменения градиентов грунтового потока за дренажной призмой, полученных по формуле акад. Н. Н. Павловского.

Анализируя полученные результаты опытов, можно сделать следующие выводы:

1. Основным фактором понижения кривой депрессии плотины № 2 является экран, уложенный по напорному откосу. Напор, погашаемый экраном (включая зуб), при отсутствии понура составляет 43% от действующего напора ($H=18$ *м*).

2. Понуры (с точки зрения понижения депрессионной кривой в теле плотины) являются по сравнению с экраном значительно менее эффективными, причем наибольшая их эффективность имеет место при короткой длине. При длине понура в 100 *м* и выше понур практически никакого влияния не оказывает ни на значения напоров, ни на значения выходных градиентов. По данным опыта глиняный понур, сопряженный с торфяным экраном, при длине его от 0 до 100 *м* погашает дополнительно всего до 19% действующего напора, причем увеличение длины понура от 100 до 161 *м*, т. е. на 61% его длины, дает лишь ничтожную потерю напора, выражающуюся всего в 1%. Таким образом по характеру кривой потерь напора длина понура в 100 *м* является предельно максимальной.

Рациональная же длина понура будет еще меньше, если принять во внимание вообще влияние понура на погашение фильтрационного напора и на уменьшение выходных градиентов.

3. Наличие трещины шириной 0,66 *м* в понуре (понур длиной 65,0 *м*) на расстоянии 25 *м* от низовой грани напорного откоса значительно повышает кривую депрессии в теле плотины, приближая ее к положению кривой депрессии при понуре длиной 25 *м*, что указывает на значительное влияние трещины.

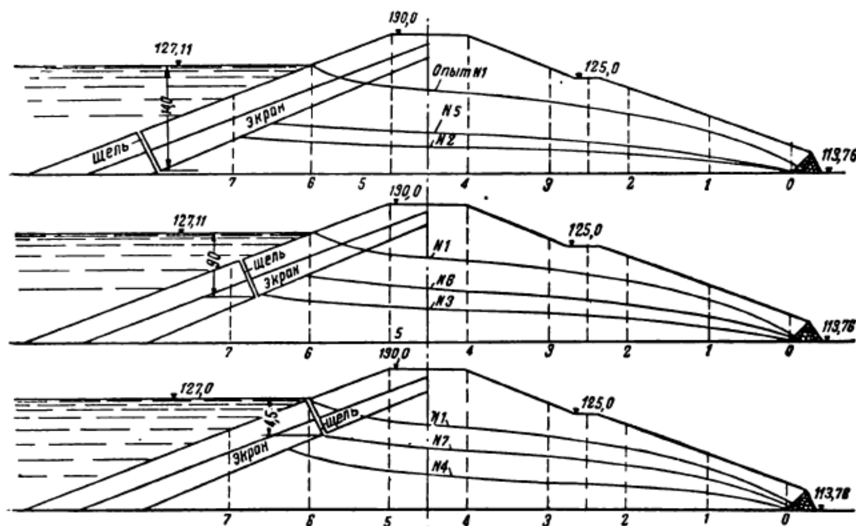
4. Фильтрационные расходы при всех опытах не превосходят расхода $q=0{,}5$ *л/сек* на 1 *пог. м* плотины в натуре.

5. Уклоны (градиенты) кривой депрессии перед входом ее в дренажную призму с антифильтром колеблются в пределах от 0,09 до 0,20, что по сравнению с критическим градиентом по Терцаги ($J_{кр}=1$) дает запас соответственно от 11 до 5. При этих значениях градиентов скорость фильтрации в порах грунта не превосходит величины $v_{ср}=0{,}0073$ *см/сек*. Сопоставление этой скорости с опасными скоростями по Тиму и Победоносцеву дает основание полагать, что вымывание частиц грунта в теле плотины практически не должно иметь места.

6. Вычисленные по формуле акад. Павловского гидравлические градиенты грунтового потока при выходе его непосредственно за дренажной призмой (фиг. 83) при всех вариантах длины понура не превышают величины $J=0{,}13$, что дает почти восьмикратный запас на выпор грунта против $J_{кр}=1$ по Терцаги.

Земляная плотина № 3

При проектировании земляной плотины № 3 были учтены все выводы, сделанные ранее по земляной плотине № 2. Кроме того составители проекта считались с возможностью образования щели в экране. Для выяснения влияния наличия щели в экране гидротехнической лабораторией Строительства были произведены дополнительные опыты. Полученные результаты представляют довольно большой интерес.



Фиг. 84. Кривые депрессии в теле земляной плотины № 3

Всего было произведено 7 опытов в зависимости от размера (a) щели и положения ее в экране плотины (h).

Для всех испытанных случаев были определены расположения депрессионных кривых, расходы и выходные уклоны (градиенты) потока на свободной поверхности перед выходом его в дренаж.

Значения отметок точек депрессионных кривых и выходных градиентов (J) в низовой части плотины приводятся в табл. 23 и на фиг. 84.

Таблица 23

Условия опытов	№ опытов	№ ординат [1]							Градиент [2] J
		0	1	2	3	4	5	6	
Без экрана	1	114,76	118,86	121,26	122,76	123,76	124,76	126,36	0,41
С экраном и щелью в нем шириной $a = 0{,}2$ м н. в. и $h = 14{,}0$ м	2	113,96	114,76	115,76	116,36	116,76	117,36	117,76	0,08
То же при $h = 9{,}0$ м	3	113,96	115,76	116,36	117,16	117,76	118,06	118,36	0,18
» » » $h = 4{,}5$ »	4	113,96	115,76	116,96	117,36	117,76	118,76	—	0,18
С экраном и щелью в нем шириной $a = 1$ м н. в. и $h = 14{,}0$ м	5	114,16	115,76	117,91	118,16	118,76	118,96	119,36	0,16
То же при $h = 9{,}0$ м	6	114,24	116,96	118,36	119,36	119,96	120,76	121,76	0,23
» » » $h = 4{,}5$ »	7	115,16	117,46	118,76	119,76	120,76	121,76	—	0,26

[1] Номера ординат кривых депрессий, расположенных от обратного фильтра к верхнему бьефу через каждые 10 м.

[2] Значения градиентов J определялись между ординатами № 0 и 1.

Расходы при напоре $H = 13{,}25$ *м* и коэфициенте фильтрации $K = 0{,}015$ *см/сек* указаны в табл. 24.

Таблица 24

№ опытов	1	2	3	4	5	6	7
Расходы в *л/сек*	0,251	0,023	0,029	0,041	0,062	0,104	0,129

Из приведенных материалов следует:

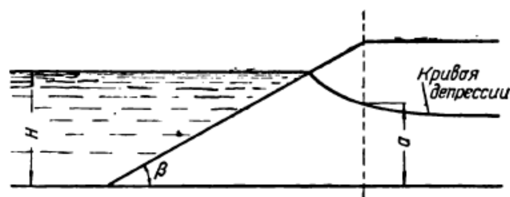
1. Экран даже с пропуском воды в какой-либо его части (щель) понижает кривую депрессии и уменьшает значение выходного градиента и фильтрационные расходы.

2. Расположение депрессионной кривой зависит, во-первых, от ширины щели в экране: чем шире щель, тем выше располагается кривая депрессии (значения выходных градиентов и расходов также соответственно возрастают с увеличением щели) и, во-вторых, от расположения щели по отношению к горизонту верхнего бьефа: чем ближе к горизонту верхнего бьефа находится щель, тем выше располагается кривая депрессии (соответственно возрастают и значения выходных градиентов и расходов).

б) Теоретическое исследование фильтрации тела земляных плотин на непроницаемом основании

Общепринятые до сих пор методы решения (акад. Павловского[1], Дахлера и др.) теоретическим путем задачи о фильтрации воды через тело земляных плотин на непроницаемых основаниях дают лишь приближенное решение, в ряде случаев сильно расходящееся с опытными данными.

В связи с этим сотрудником гидротехнической лаборатории Строительства канала Москва—Волга Т. М. Василишиным на основе накопленного экспериментального материала была сделана попытка создания более точного и удобного для практического пользования решения расчета земляных плотин.



Фиг. 85

В предложенной теоретической схеме движения Т. М. Василишин рассматривает движение фильтрационного потока аналогично упомянутым выше исследованиям раздельно в верховом клине, средней части и низовом клине. Кратко приводим вывод расчетных уравнений.

Для определения фильтрационного расхода в верховом клине плотины воспользуемся следующей формулой Дахлера[2] (обозначения см. на фиг. 85):

$$q = ka\,(1{,}12 + 1{,}93\ \lg\beta), \tag{31}$$

где k — коэфициент фильтрации.

Формула (31) дает приближенное решение, вполне удовлетворяющее всем пограничным условиям, причем окончательный результат практически совпадает с вполне точным решением.

Уравнение фильтрационного расхода в низовом клине плотины. Самой ответственной частью фильтрационного расчета земляных плотин и дамб являются определение точки выхода кривой депрессии на откос и определение выходных фильтрационных скоростей.

Если в прямоугольной системе координат y означает геометрическую высоту

[1] Акад. Павловский Н. Н., О фильтрации воды через земляные плотины. Институт мелиорации и гидротехники, Сектор гидротехнических сооружений, Ленинград 1931.

[2] См. журн. «Die Wasserwirtschaft» № 3—4, 1933.

или отметку движущейся точки над плоскостью сравнения, а $\frac{p}{\gamma}$ — пьезометрическую высоту, то пьезометрический напор для любой движущейся точки потока примет значение:

$$h = \frac{\varphi}{k} = y + \frac{p}{\gamma},$$

где φ — скоростной потенциал.

Для свободной поверхности, т. е. при $\frac{p}{\gamma} = 0$, получим:

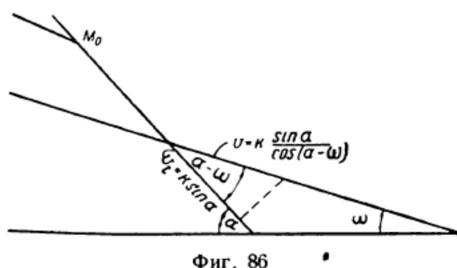
$$\frac{\varphi}{k} = y \text{ или } \varphi = ky. \tag{32}$$

В предположении, что процесс фильтрации подчиняется закону Дарси, скорость на депрессионной поверхности выразится следующей формулой:

$$v = \frac{\partial \varphi}{\partial s} = k \frac{\partial y}{\partial s} = k \sin \alpha',$$

где α' — угол, который кривая депрессии в данной точке образует с горизонталью.

В точке M_0, в которой депрессионная кривая выходит на откос (фиг. 86), т. е. в точке, лежащей одновременно и на кривой дерессии и на откосе, условия для образования кривой депрессии остаются прежние, так как $\frac{p}{\gamma} = 0$.



Фиг. 86

Следовательно градиент ее получит значение:

$$J = \frac{\partial y}{\partial s} = \sin \alpha,$$

где α — угол откоса. Скорость в точке M_0 будет равна:

$$v = k \sin \alpha. \tag{33}$$

Скорость движущейся частицы жидкости по кривой депрессии в точке M_0 будет равна $k \sin \alpha$ только тогда, когда направление ее в точке M_0 будет совпадать с откосом. Таким образом будем считать, что направление скорости потока в точке выхода кривой депрессии на откос будет создавать с горизонталью угол α; направления скоростей каждой другой из линий тока в низовом клине плотины, лежащей ниже кривой депрессии, при выходе на откос будут образовывать с горизонталью угол $\omega < \alpha$, который по мере отдаления от точки M_0 к подошве откоса будет изменяться от α (для точки M_0) до 0 (для линии, совпадающей с непроницаемым основанием). Конечно для линии тока, имеющей другое направление, скорость $v = k \sin \alpha$ будет являться компонентом ее (v_t), совпадающим с откосом. Зная слагающую скорость v_t и направление линии тока при выходе ее на откос, получим ее скорость. Она будет равна (фиг. 86):

$$v = k \frac{\sin \alpha}{\cos(\alpha - \omega)}. \tag{34}$$

Теперь нетрудно перейти к определению фильтрационного расхода в низовом клине плотины. Можно допустить, что направление выходных скоростей линий тока в низовом клине изменяется по следующему закону:

$$ds = n d\omega. \tag{35}$$

Из последнего равенства после интегрирования получим:

$$s = n\alpha,$$

откуда

$$n = \frac{s}{\alpha} \text{ и } ds = \frac{s}{\alpha} d\omega \text{ (фиг. 87).}$$

Величина элементарного расхода струйки dq будет:

$$dq = dhv.$$

Из фиг. 87 имеем:

$$dh = ds \sin(\alpha - \omega).$$

Так как

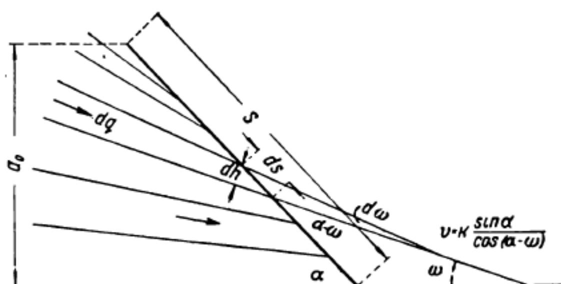
$$ds = \frac{s}{\alpha} d\omega \text{ и } s = \frac{a_0}{\sin\alpha},$$

то

$$dh = \frac{a_0 \sin(\alpha - \omega)}{\alpha \sin\alpha} d\omega.$$

Для определения элементарного расхода тогда получим:

$$dq = dhv = \frac{a_0 k \sin(\alpha - \omega) d\omega}{\alpha \cos(\alpha - \omega)} = \frac{ka_0}{\alpha} \operatorname{tg}(\alpha - \omega) d\omega,$$



Фиг. 87. Расчетная схема для распределения фильтрационного расхода в низовом клине плотины

а после интегрирования получим полный фильтрационный расход:

$$q = -\frac{ka_0}{\alpha} \ln\cos\alpha. \tag{36}$$

Н. Н. Павловским для определения фильтрационного расхода в низовом клине плотины получена формула:

$$q = \frac{a_0 k}{m_1}, \tag{37}$$

где

$$m_1 = \operatorname{ctg}\alpha.$$

Вышеприведенное условие, выраженное формулой (37), справедливо и при несколько иных условиях протекания фильтрационного потока. Так как в основу рассмотрения процесса фильтрации положен закон Дарси, то в дальнейших рассуждениях можно воспользоваться методом конформных преобразований, принимая для свободной поверхности условие (32). Это позволяет подобрать соответствующую отображающую функцию; такой функцией будет[1]:

$$z = \frac{1}{2kq} w^2, \tag{38}$$

где q — линия тока свободной поверхности;

z и w — комплексные числа; отсюда:

$$x = \frac{1}{2kq}(\varphi^2 - \psi^2); \tag{39}$$

$$y = \frac{\varphi\psi}{qk}. \tag{40}$$

[1] См. статью Козени в журнале «Wasserkraft und Wasserwirtschaft», H. 3, 1931.

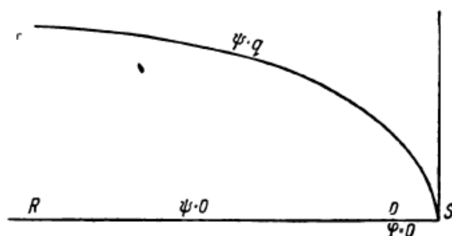
Подставляя в последнее уравнение $\psi = q$ значение для линии тока свободной поверхности, получаем $\varphi = ky$, т. е. условие для свободной поверхности после преобразования удовлетворяется.

Для $\varphi = ky$ и $\psi = q$ уравнение для депрессионной кривой примет следующий вид:

$$kx = \frac{1}{2q}(k^2y^2 - q^2). \tag{41}$$

Таким образом свободная поверхность (депрессионная кривая) в плоской задаче представляет собой параболу с началом координат в ее фокусе. Нетрудно убедиться, что вершина ее будет иметь координаты:

$$x = -\frac{q}{2k},\ y = 0.$$



Фиг. 88

Рассмотрим остальные пограничные условия этого потока. Так как для $\psi = 0$ $y = 0$, то, значит, нижняя линия тока указанного потока идет горизонтально вдоль непроницаемой линии RO до фокуса параболы (фиг. 88).

На участке OS (между фокусом параболы и ее вершиной) $\varphi = 0$; это значит, что через отверстие (щель) поток выходит свободно. Очевидно, все остальные линии токов будут образовывать софокусные параболы.

Если предположим теперь, что щель в непроницаемом основании расположена таким образом и имеет такие размеры, что депрессионная кривая потока касается низового откоса, не выходя на дневную поверхность, то получим условие, которое выражено формулой акад. Павловского для определения фильтрационного расхода в низовом клине плотины.

В самом деле, продиференцировав уравнение:

$$kx = \frac{1}{2q}(k^2y^2 - q^2),$$

получим:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{q}{ky}.$$

А так как $\frac{dy}{dx} = \frac{1}{m_1}$ и принимая $y = a_0$, получим:

$$\frac{q}{k} = \frac{a_0}{m_1},$$

т. е. имеем уравнение акад. Павловского для низового клина.

Таким образом формула акад. Павловского для определения расхода в низовом клине плотины была бы верна в том случае, если бы поток, касаясь низового откоса, не выходил из него, а поступал свободно в щель между фокусом и вершиной параболы, которую кривая депрессии этого потока образует.

Уравнение фильтрационного расхода в средней части плотины. Пользуясь уравнением (41), найдем формулу для определения фильтрационного расхода средней части плотины.

Для этой цели перенесем начало координат в первое раздельное сечение при помощи формул:

$$x = \frac{k}{2q}(H - a)^2 - x' - \frac{q}{2k}; \tag{42}$$

$$y = y'.$$

Получим (пропуская индексы):

$$\frac{2qx}{k} = (H-a)^2 - y^2. \tag{43}$$

Принимая в уравнении (43) $x = L - m_1 a_0$, для которого $y = a_0$, получим окончательную формулу для расхода в средней части плотины в следующем виде:

$$\frac{q}{k} = \frac{(H-a)^2 - a_0^2}{2(L - m_1 a_0)}. \tag{44}$$

Заметим, что аналогичная формула получается и по уравнению Дюпюи. На основании приведенного анализа и теоретического вывода получаем:

Для случая однородной плотины без дренажа и при отсутствии воды в нижнем бьефе следующую систему уравнений:

а) Верховой клин:

$$\frac{q}{k} = (1{,}12 + 1{,}93 \lg \beta)\, a.$$

б) Средняя часть плотины:

$$\frac{q}{k} = \frac{(H-a)^2 - a_0^2}{2(L - m_1 a_0)}. \tag{45}$$

в) Низовой клин:

$$\frac{q}{k} = -\frac{a_0 \ln \cos\alpha}{\alpha}.$$

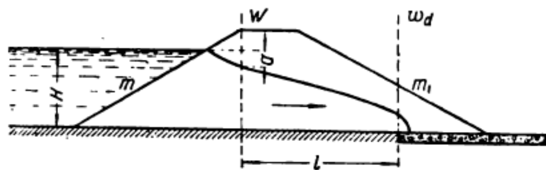
Определив значения $\frac{q}{k}$, a и a_0, можно по уравнению

$$y^2 = (H-a)^2 - \frac{2q}{k}x$$

построить кривую депрессии в теле земляной плотины.

Из уравнений (45) видно, что расположение кривой депрессии в однородном теле земляной плотины не зависит от коэфициента фильтрации грунта, как это установлено и другими исследователями. Желая изменить расположение кривой депрессии и расходы, необходимо изменить длину пути фильтрации и наклон откосов плотины.

При наличии дренажа в низовом клине отсутствуют условия истечения грунтового потока через низовой откос (фиг. 89) и таким образом из системы трех фильтрационных уравнений (45) останутся только два.



Фиг. 89

Первое уравнение

$$\frac{q}{k} = (1{,}12 + 1{,}93 \lg \beta)\, a$$

остается без изменений; второе же уравнение получаем следующим образом.

Фильтрацию потока в дренаж можно сравнить со случаем, когда поток движется в грунте по горизонтальному подстилающему слою, в продолжении которого находится щель, куда поток и входит свободно, как это имеет место при наличии дренажа.

Для этого случая было получено уравнение (41):

$$kx = \frac{1}{2q}(k^2y^2 - q^2),$$

которое геометрически представляет собой параболу при расположении начала координат в ее фокусе.

Если расстояние от начала фильтра до первого раздельного сечения W, в котором напор равен $H - a$, обозначим через l, то для координат $(l,\ H - a)$ второе уравнение (45) примет следующий вид:

$$\left(\frac{q}{k}\right)^2 + \frac{2q}{k}l = (H - a)^2.$$

Таким образом для ф и л ь т р а ц и о н н о г о р а с ч е т а з е м л я н ы х п л о т и н с д р е н а ж е м получаем следующую систему уравнений:

а) Верховой клин:

$$\frac{q}{k} = (1{,}12 + 1{,}93\lg\beta)\,a.$$

б) Средняя часть:

$$\left(\frac{q}{k}\right)^2 + \frac{2q}{k}l = (H - a)^2, \qquad (46)$$

где H — напор;

a — потеря напора в пределах верхового клина;

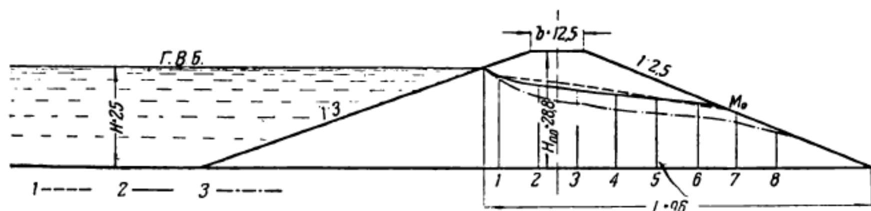
q — расход;

k — коэфициент фильтрации;

l — расстояние от начала фильтра до первого раздельного сечения.

Приведенные выше уравнения для определения расходов и расположения депрессионных кривых были проведены на моделях в фильтрационном лотке и методом ЭГДА. Кроме того для тех же условий произведены были расчеты и по методу акад. Павловского.

Фильтрационные расходы, полученные по приведенным формулам и по опытам, дали практически одинаковые результаты; полученные же по методу акад. Павловского оказались меньше опытных на 30% и больше.



Фиг. 90. Сравнение депрессионных кривых в теле земляной плотины, полученных по методу акад. Павловского и по опытным данным: 1 — по опытам в фильтрационном лотке; 2 — по новым опытам и методу ЭГДА; 3 — по Павловскому

Полученные данные (фиг. 90) также показали, что расчеты по приведенным выше формулам дают более близкое совпадение, чем расчетные данные, получаемые по Павловскому. Это позволяет считать предлагаемый метод фильтрационного расчета практически более достоверным.

Остановимся вкратце на применении полученных уравнений к расчету з е м л я н ы х п л о т и н н а н е п р о н и ц а е м ы х о с н о в а н и я х, и м е ю щ и х э к р а н ы и л и я д р а.

Для этого необходимо изменить упомянутые уравнения следующим образом:

1. Для случая, когда кривая депрессии выходит на низовой откос, будем иметь:

а) Верховой клин:

$$\frac{q}{k} = (1,12 + 1,93 \lg \beta) a.$$

б) Средняя часть:

$$\frac{q}{k} = \frac{(H-a)^2 - a_0^2}{2\left(L + \frac{k}{k_0} t - m_1 a_0\right)}. \qquad (47)$$

в) Низовой клин:

$$\frac{q}{k} = -\frac{a_0 \ln \cos \alpha}{\alpha},$$

где k_0 — коэфициент фильтрации экрана;
t — толщина экрана;
остальные обозначения — прежние.

2. Для случая, когда поток поступает в дренаж, будем иметь:

а) Верховой клин:

$$\frac{q}{k} = (1,12 + 1,93 \lg \beta) a.$$

б) Средняя часть:

$$\left(\frac{q}{k}\right)^2 + \frac{2q}{k}\left(l + \frac{k}{k_0} t\right) = (H-a)^2. \qquad (48)$$

Сопоставление ординат кривой депрессии, вычисленной по предлагаемым формулам, формулам акад. Павловского и опытным данным, полученным в фильтрационном лотке, показывает следующее значение ординат (в *см*) кривой депрессии в теле плотины с экраном, расположенным по верховому откосу (табл. 25).

Таблица 25

Обозначения ординат	Без дренажа			С дренажем		
	по новым формулам	по Павловскому	по опыту	по новым формулам	по Павловскому	по опыту
y_1	1,40	1,89	1,40	6,32	9,58	—
y_2	1,35	1,76	1,40	5,85	8,80	5,80
y_3	1,25	1,63	1,40	5,34	7,82	5,25
y_4	1,19	1,50	1,30	4,75	6,92	4,50
y_5	1,13	1,34	1,30	4,15	5,74	3,75
y_6	1,07	1,18	—	3,40	4,25	—
y_7	0,90	0,97	1,90	2,43	1,72	—

При расчетах было принято
для случая без дренажа:

$$\frac{k}{k_0} = 45\,000, \quad t = 2 \text{ см};$$

для случая с дренажем:

$$\frac{k}{k_0} = 1\,000, \quad t = 1 \text{ см}.$$

Хотя последние формулы [(47) и (48)] можно считать теоретически не вполне обоснованными, все же, как видно из приведенной выше таблицы, они дают данные, достаточно хорошо совпадающие с опытом. Такого совпадения при пользовании формулами акад. Павловского не наблюдается.

ГЛАВА VII

ИССЛЕДОВАНИЯ ШЛЮЗОВ И ПОДХОДОВ К НИМ

1. ИССЛЕДОВАНИЕ ШЛЮЗОВ

Судоходные шлюзы канала Москва—Волга испытывались в гидротехнической лаборатории Строительства в течение четырех лет — с 1932 по 1936 гг.

Вся работа по производству опытов проводилась одновременно с проектированием, а частично и параллельно с постройкой самих сооружений. Последнее обстоятельство наложило своеобразный отпечаток как на программу и методику исследования, так и на результаты опытов.

Огромный материал, полученный в результате проведенных опытов, представляет собой главным образом необработанные хронограммы по прибору проф. Маккавеева, применявшемуся для определения усилий. Таких хронограмм накопилось более 6 000. Однако принятая методика производства опытов и программы исследований не имели в виду использовать этот материал для получения выводов более общего характера, и только в настоящее время разработана методика обработки опытных данных и проделана большая работа по частичному их обобщению[1].

В связи с этим настоящее изложение делится на две части: в первой части излагаются результаты опытов, а во второй приводится метод гидравлического расчета, фактически применявшийся на Строительстве канала.

а) Результаты опытных данных

Для наполнения и опорожнения шлюзных камер шлюзов канала Москва—Волга были приняты два типа питания:

1) наполнение камер через щель, образующуюся при подъеме на некоторую высоту сегментных ворот верхней головы;

2) наполнение и опорожнение камер через короткие обходные водопроводные галлереи, перекрываемые плоскими затворами.

Для наполнения всех камер, включая верхние камеры двухкамерных шлюзов, был принят первый тип питания, а для опорожнения камер, включая и наполнение нижней камеры (или опорожнение верхней камеры) двухкамерных шлюзов, принят второй тип питания.

Время наполнения или опорожнения было принято примерно в 13 мин.

Так как для наполнения был принят первый тип питания и площадь щели могла быть увеличена до полного сечения шлюза у верхней головы его, то здесь важно было установить скорость и высоту подъема сегментных ворот.

Для указанных целей в гидротехнической лаборатории Строительства канала было организовано исследование шлюзов в масштабе 1 : 40 натуральной величины (фиг. 13).

Все 11 шлюзов канала в зависимости от напора (а также применительно к лабораторным испытаниям) были разделены на две группы.

К первой группе относились типовые шлюзы:

1) по условиям наполнения: шесть шлюзов с напором порядка $H = 9$ *м*. Опыты проводились на модели верхней головы одного из шлюзов ($H = 8{,}75$);

2) по условиям опорожнения: семь шлюзов также с напором порядка $H = 9$ *м*. Опыты проводились на модели нижней головы одного из шлюзов (с напором $H = 9{,}55$ *м*).

Ко второй группе были отнесены нетиповые шлюзы:

1) по условиям наполнения: верхние головы пяти шлюзов и средние головы двух двухкамерных шлюзов;

---

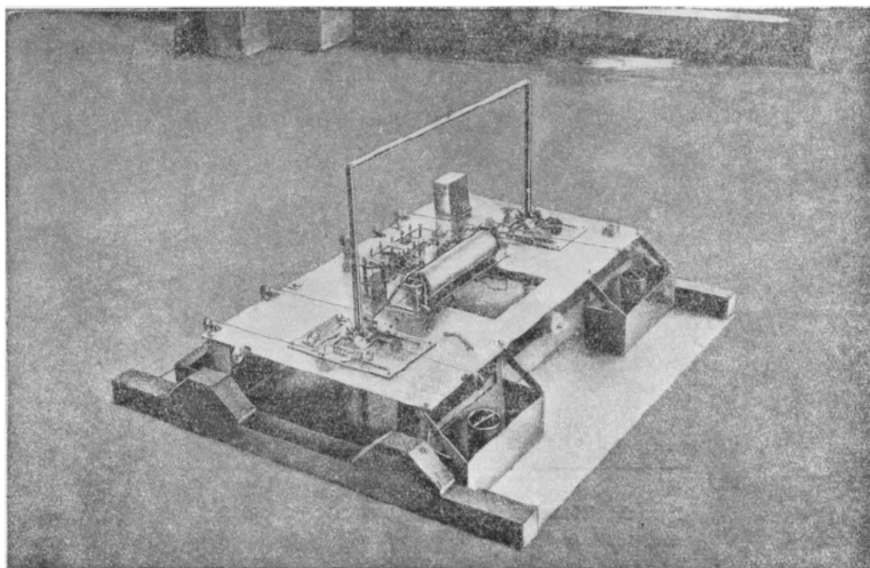
[1] Обработка результатов исследований по шлюзам и разработка методики соответствующих расчетов были произведены на Строительстве канала в основном инж. В. Ф. Тейтельман.

2) по условиям опорожнения: нижние головы четырех шлюзов и средние головы двухкамерных шлюзов.

Экспериментальным путем необходимо было разрешить следующие вопросы:

1. Наполнение камеры через верхнюю голову. Необходимо было подобрать такую схему гашения энергии потока у верхней головы, а также скорость и высоту подъема сегментных ворот, при которых при заданной системе лобового наполнения и времени наполнения (13 мин.) гарантировалось бы получение максимального давления на шлюзуемые суда не выше допустимого (т. е. $^1/_{1000}$—$^1/_{750}$ от грузоподъемности).

2. Опорожнение камеры шлюзов. Необходимо было выбрать такую скорость подъема затворов и такую форму водопроводных галлерей и размеры водобойных колодцев, чтобы при заданных системе опорожнения и времени опорожнения получить максимальное давление на шлюзуемые и ожидающие шлюзования суда[1]



Фиг. 91. Общий вид прибора Маккавеева

не выше допустимого, а пьезометрическое давление за щитом водопроводных галлерей не ниже 7,0 *м* вод. ст. во избежание явления кавитации за затвором.

3. Кроме того те элементы питания, которые были получены расчетом по изложенному ниже методу, необходимо было также проверить экспериментально.

В качестве измерительной аппаратуры были применены прибор проф. Маккавеева, регулятор скоростей, водослив Базена, шпитценмасштабы и хронометры.

Прибор проф. Маккавеева[2] (фиг. 91, 92) служил для фиксирования продольного, поперечного и вертикального перемещения судна, кривой подъема затвора и времени.

Для более точного фиксирования времени в цепь контактного пера был включен маятник Кнеллера. Продольные и поперечные перемещения судна по расчетным формулам пересчитывались на величину продольного и поперечного давлений на судно.

Регулятор скоростей служил для обеспечения подъема затвора с определенной скоростью (фиг. 93).

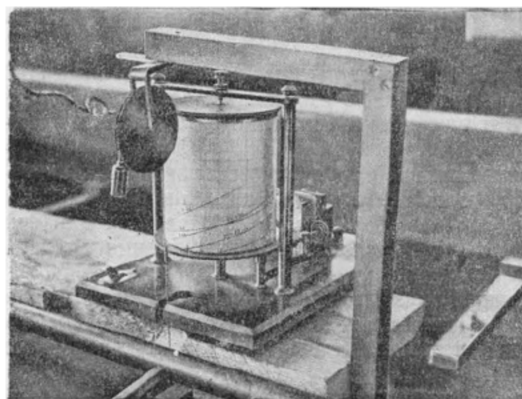
---

[1] На расстоянии около 60 *м* от нижней головы шлюза.

[2] Подробное описание прибора см. «Сборник ЛИИПС», вып. CVII, Ленинград, 1930, стр. 106—112.



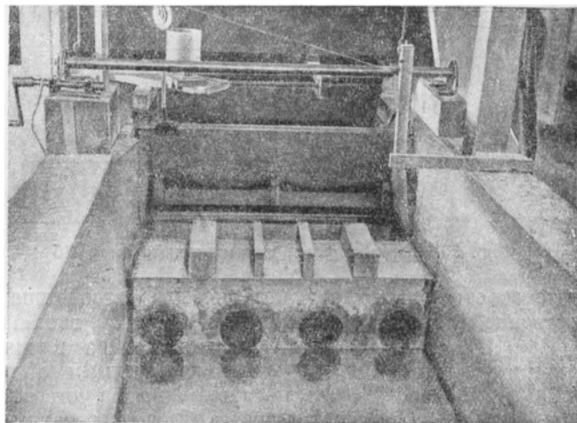
Фиг. 92. Общий вид модели шлюза с установленным прибором Маккавеева.



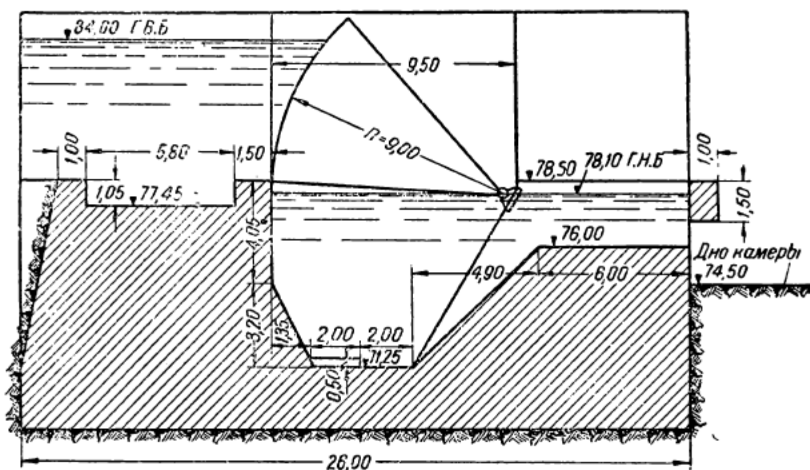
Фиг. 93. Общий вид регулятора скоростей подъема затвора

Принципиально прибор этот может служить для подъема затвора по любому наперед заданному закону движения. Для этого на барабане регулятора (скорость вращения барабана известна) вычерчивается кривая [или прямая $h_з = f(t)$] подъема затвора (по времени) в соответствующем масштабе. Скользящее по барабану перо нитью, перекинутой через блок, соединяется с затвором.

Для фиксации наиболее интересных гидравлических моментов в процессе опытов применялось фотографирование.



Фиг. 94. Общий вид модели верхней головы типового шлюза канала Москва — Волга

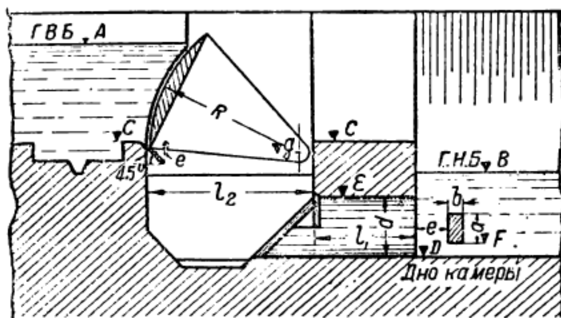


Фиг. 95. Схема верхней головы шлюза типа IIе

б) Результаты исследований

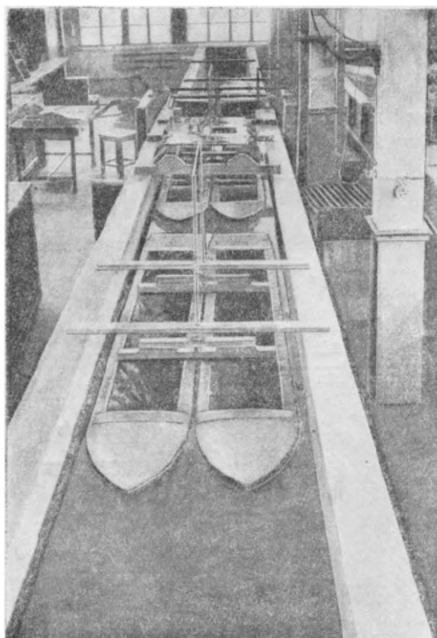
1. С х е м а г а ш е н и я э н е р г и и п о т о к а п р и н а п о л н е н и и к а м е р ш л ю з о в ч е р е з в е р х н ю ю г о л о в у; п р и н я т ы е с к о р о с т и и в ы с о т а п о д ъ е м а в о р о т; у с л о в и я о т с т о я с у д о в. Обеспечение наполнения камеры в 13 мин. при сохранении постоянной скорости подъема затвора (по требованию технического отдела Строительства)

и при условии, чтобы продольные усилия $Д_{прод\ max}$ и поперечные усилия $Д_{поп\ max}$ были не выше допускаемых, равных $Д_{доп} = (^1/_{750} - {}^1/_{1000})\ W$, где W — грузоподъемность судна в m, потребовало от лаборатории разработки специальной схемы гашения энергии.



Фиг. 96. Схема верхней головы шлюза типа IIб

В результате всех опытов схема гашения была разработана в следующем виде. Непосредственно за стенкой падения в верхней голове шлюза была устроена тормозная камера в виде массива с четырьмя круглыми отверстиями[1]. Непосредственно за отверстиями внутри камеры была установлена балка для восприятия лобового удара струй, выходящих из отверстий (фиг. 94).



Фиг. 97. Исследование условий отстоя четырех барж грузоподъемностью 4 000 m в камере шлюза

Для ликвидации усилий, возникающих при истечении воды из-под затворов и стремящихся прижать его к порогу, к нижней кромке затвора был приделан козырек.

Указанные выше элементы были подобраны в соответствии со скоростью подъема ворот и высотой их открытия.

Схемы верхних голов испытанных типов шлюзов приведены на фиг. 95 и 96.

При осуществлении указанной схемы гашения энергии потока шлюзуемые суда испытывали продольное и поперечное давления $D_{прод}$ и $D_{поп}$, не превышавшие $^1/_{750} - {}^1/_{1000}$ от водоизмещения.

Испытанию подвергались баржи грузоподъемностью 18 000, 6 000, 4 200, 4 000 и 1 000 m (фиг. 97 и 98).

Однако основной баржей для испытания служила баржа размером 100 × × 16 × 3,0 $м$ и грузоподъемностью 4 000 m, замененная впоследствии баржей размером 110 × 14 × 3,65 $м$ и грузоподъемностью 4 200 m.

Результаты проведенных опытов даны в табл. 26, где приведены данные для некоторых случаев по трем хронограммам, лучшим по качеству проведенного эксперимента.

[1] Исключение представляют два шлюза (тип I и II), где вместо массива подобран был балочный экран. Характеристику типов шлюзов, построенных на канале Москва — Волга, см. выпуск отчета «Путевые сооружения».

Таблица 26

№ п/п	Тип шлюза	№ опытов	Напор H_n в *м*	Начальная глубина в камере $h_к$ в *м*	Скорость подъема сегментных ворот $v_з$ в *м/мин*	Высота подъема сегментных ворот $h_з$ в *м*	Время подъема сегментных ворот t_0 в сек.	Время наполнения камеры *T* в сек.	Максимальное продольное давление $D_{прод}$ в *т*	Время, соответствующее максимальному продольному давлению, от начала наполнения $t'_{прод}$ в сек.	Максимальное поперечное давление $D_{поп}$ в *т*	Время, соответствующее максимальному поперечному давлению, от начального наполнения $t''_{поп}$ в сек.	Грузоподъемность судна *W* в *т*
1	I	183	6,00	1,50	0,25	1,00	242	300	0,08	197	0,12	107	73
2	II	212	6,00	1,50	0,25	1,00	242	300	0,10	187	0,12	158	73
3	II	213	6,00	1,50	0,25	1,00	242	300	0,12	169	0,15	95	73
4	IIб	40	8,75	5,50	0,20	1,80	545	745	2,00	184	1,25	314	4 200
5	IIб	38	8,75	5,50	0,20	1,80	536	742	2,20	304	1,25	290	4 200
6	IIб	36	8,75	5,50	0,20	1,80	542	745	2,40	329	1,75	251	4 200
7	IIг[1]	9а	6,31	5,19	0,17	1,20	413	773	1,80	—	0,10		4 000
8	IIг	10	6,31	5,19	0,17	1,20	419	736	1,90	430	0,10	126	4 000
9	IIг	9	6,31	5,19	0,17	1,20	419	739	2,00	473	0,25	156	4 000
10	IIг[2]	102	6,00	5,50	0,20	1,20	359	454	1,00	177	0,50	164	4 200
11	IIг	112	6,00	5,50	0,20	1,20	356	454	1,00	153	0,40	157	4 200
12	IIг	110	6,00	5,50	0,20	1,20	350	444	1,00	135	0,50	140	4 200
13	IIе[3]	159	6,40	3,10	0,17	1,20	600	749	1,20	250	0.75	372	1 000
14	IIе	175	6,40	3,10	0,17	1,20	605	767	1,50	258	1,00	436	1 000
15	IIе	174	6,40	3,10	0,17	1,20	611	767	1,50	286	1,50	294	1 000
16	IIж	2	9,00	5,50	0,20	1,80	532	739	1,80	168	0,50	209	4 000
17	IIж	7	9,00	5,50	0,20	1,80	536	745	2,00	165	0,50	216	4 000
18	IIж	4	9,00	5,50	0,20	1,80	532	745	2,20	466	0,50	297	4 000
19	III	117	13,00	5,50	0,20	2,00	604	810	2,80	440	1,25	350	4 000
20	III	118	13,00	5,50	0,20	2,00	604	810	3,10	410	1,25	410	4 000
21	III	114	13,00	5,50	0,20	2,00	604	810	3,50	320	1,25	348	4 000
22	III[4]	125	17,10	1,40	0,06	1,20	1 134	1 557	0,80	500	0,50	855	1 000
23	III	126	17,10	1,40	0,06	1,20	1 134	1 576	0,80	500	0,50	855	1 000
24	III	127	17,10	1,40	0,06	1,20	1 134	1 544	1,00	500	0,50	855	1 000
25	IVб	11	10,18	5,50	0,20	1,80	536	779	2,40	423	1,25	334	4 200
26	IVб	3	10,18	5,50	0,20	1,80	542	785	3,10	368	1,50	352	4 200
27	IVб	4	10,18	5,50	0,20	1,80	536	776	4,00	406	1,00	417	4 200

[1] Указанные данные могут иметь место до постройки нижней плотины.
[2] Наполнение всей камеры.
[3] Наполнение всего отсека камеры.
[4] Подъем ворот с остановкой: 1) $h_1 = 0,5$ *м*; $t'_0 = 174$ сек; 2) остановка $t''_0 = 174$ сек.; 3) $h_2 = 0,70$ *м*; $t'''_0 = 252$ сек.

В приведенной таблице даны значения: продольного максимального давления $D_{прод\ max}$ и момента в натуре, когда это давление наступает ($t'_{кр}$); максимального поперечного давления $D_{поп\ max}$ и момента наступления этого давления ($t''_{кр}$).

Испытуемые суда устанавливались обычно на расстоянии 10 *м* от наружной грани массива.

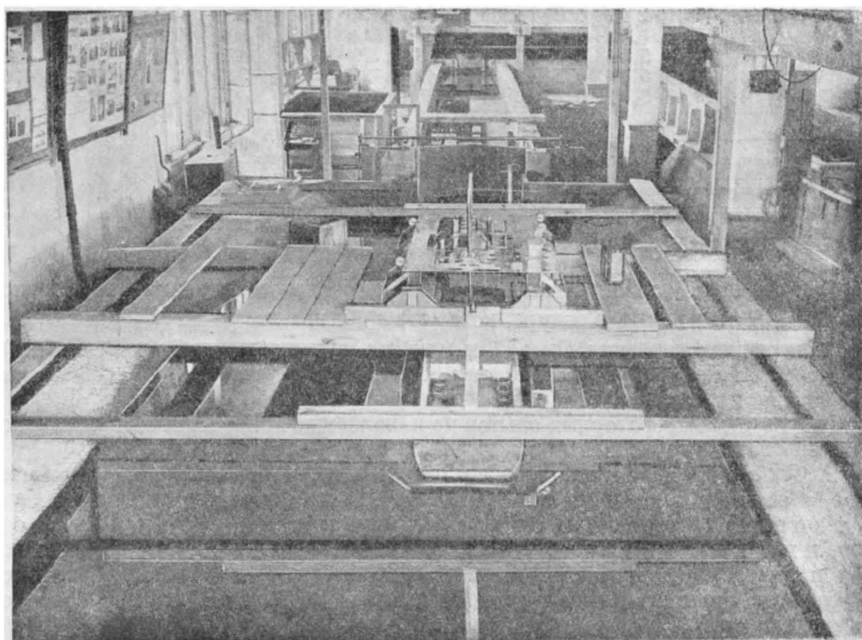
Результаты лабораторных опытов по наполнению камер шлюзов при стоянке в камере баржи грузоподъемностью 18 000 *т* приведены в табл. 27.

2. Условия опорожнения камер шлюзов; принятые размеры сечения галлерей и скорость подъема затворов; условия отстоя судов в камерах шлюзов и в нижнем бьефе. В результате гидравлического расчета, проводившегося по методу, изложенному ниже (см. п. «в» настоящей главы «Обработка результатов опытов»), были получены размеры и площади сечения водопроводных галлерей.

Как уже указывалось выше, для производства расчета потребовалось опытным путем установить скорость подъема затворов (или время подъема затворов — *t*).

Таблица 27

№ п/п	Тип шлюза	№ опытов	Напор H_n в м	Начальная глубина в камере h_k в м	Скорость подъема затвора $v_з$ в м/мин	Высота подъема затвора $h_з$ в м	Время подъема затвора $t_в$ в сек.	Время наполнения камеры T в сек.	Максимальные давления на судно в т: продольное $D_{прод}$	поперечное $D_{поп}$: на носу	поперечное $D_{поп}$: на корме	Расстояние судна от массива l в м
1	IIб	5	8,75	5,50	0,20	1,80	548	749	18,20	1,60	1,60	10
2	IIб	6	8,75	5,50	0,20	1,80	536	742	20,00	2,70	2,70	10
3	IIб	10	8,75	5,50	0,20	1,80	536	742	20,50	2,20	2,20	10
4	IIб	20	8,75	5,50	0,20	1,80	542	742	13,10	2,20	2,20	75
5	IIб	21	8,75	5,50	0,20	1,80	536	742	14,90	1,10	1,00	75
6	IIб	23	8,75	5,50	0,20	1,80	542	745	16,00	1,60	1,60	75
7	IIг	83	6,00	5,50	0,16	1,20	444	742	15,00	0,30	0,10	40
8	IIг	84	6,00	5,50	0,16	1,20	450	742	15,00	0,10	0,20	40
Наполнение нижней камеры при стоянке в ней судна для двухкамерных шлюзов												
9	III	184	13,00	5,50	0,20	2,00	604	816	12,80	3,00	2,30	50
10	III	185	13,00	5,50	0,20	2,00	592	810	13,10	2,30	2,30	50
11	III	183	13,00	5,50	0,20	2,00	598	810	14,10	1,10	1,10	50
12	IVа	73	17,95	5,50	0,50	4,00	482	649	14,70	2,30	1,50	10
13	IVа	74	17,95	5,50	0,50	4,00	482	646	14,70	2,30	1,90	10
14	IVа	90	17,95	5,50	0,10	2,24	1 410	1 410	3,50	0,40	0,25	10
15	IVа	94	17,95	5.50	0,10	2,30	1 398	1 398	4,10	0,30	0,40	10
16	IVа	93	17,95	5,50	0,10	2,28	1 408	1 408	4,50	0,40	0,70	10
17	IVб	64	20,04	5,50	0,55	4,00	429	630	20,80	1,09	1,09	10
18	IVб	66	20 04	5,50	0,55	4,00	435	636	20,80	1,60	1,60	10
19	IVб	65	20,04	5,50	0,55	4,00	435	636	20,80	2,18	2,18	10
20	IVб	57	20,04	5,50	0,10	2,45	1 461	1 461	3,80	0,20	0,20	10
21	IVб	52	20,04	5,50	0,10	2,45	1 467	1 467	4,24	0,54	0,20	10
22	IVб	60	20,04	5,50	0,10	2,45	1 461	1 461	5,10	0,30	0,30	10



Фиг. 98. Исследование условий отстоя баржи 1 000 *т* в камере шлюза

исходя из условия сохранения времени опорожнения камеры в 13 мин. При этом для случая опорожнения камеры шлюза через водопроводные галлереи нижней головы лимитирующим являлось условие стоянки судна в нижнем подходном канале[1]; для случая же опорожнения через водопроводные галлереи средних голов двухкамерного шлюза лимитирующим являлось условие стоянки судна в нижней камере.

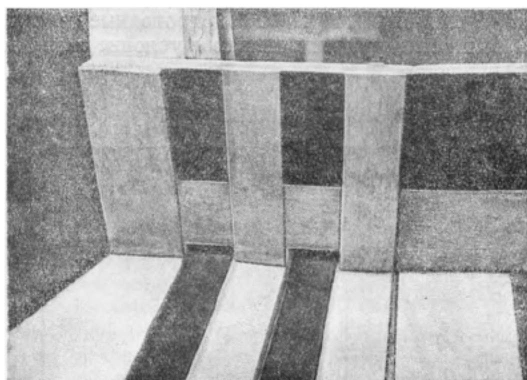
Фиг. 99. Схема нижней головы типового шлюза канала Москва — Волга

Для решения указанной задачи была разработана схема гашения энергии потока, основанная на принципе потери энергии потока при столкновении двух струй, направленных навстречу друг другу.

Конструктивно приведенное решение было оформлено следующим образом: для нижних голов в виде двух водобойных прорезей в бетонном флютбете (фиг. 99 и 100) против выходных отверстий глубиной 2 *м*; для средних голов в виде тормозной камеры по типу тормозных камер верхних голов, перекрытой

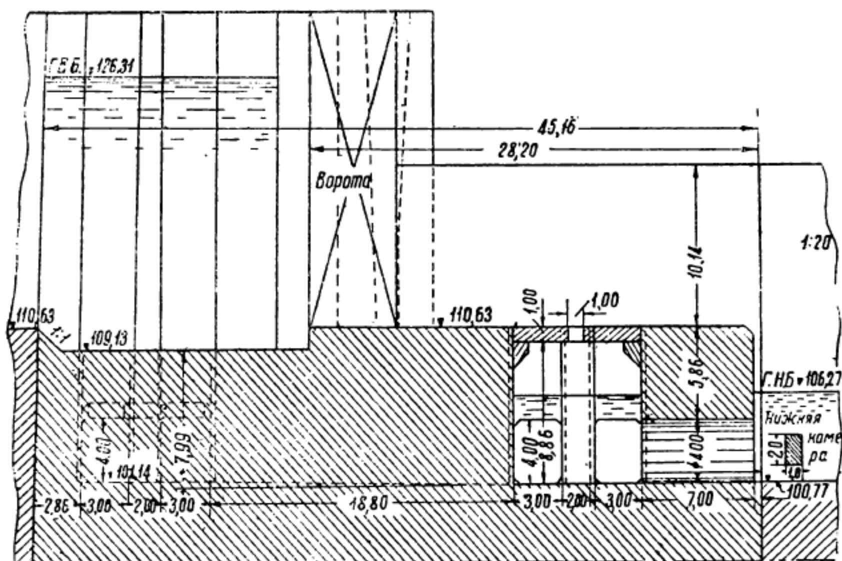
[1] При опорожнении камер шлюзов условия стоянки судна в опоражнивающиеся камере не являлись лимитирующими.

сверху плитой; со стороны нижней камеры у выходных отверстий массива тормозной камеры была установлена балка-гаситель (фиг. 101).



Фиг. 100. Общий вид выходных отверстий и водобойных прорезей в нижней голове шлюза

Кроме того в результате проведенного исследования было получено расстояние, безопасное для стоянки судов в нижнем подходном канале, равное 50 — 120 *м*.



Фиг. 101. Схема средней головы двухкамерного шлюза

Полученные лабораторные значения продольного и поперечного давления на суда, ожидавшие шлюзования в нижнем подходном канале, видны из табл. 28.

Результаты лабораторных опытов по выяснению условий стоянки судна грузоподъемностью в 18 000 *т* в нижнем подходном канале при опорожнении камер шлюзов приведены в табл. 29.

Таблица 28

Результаты лабораторных опытов по выяснению условий стоянки судов в нижнем подходном канале при опорожнении камер шлюзов

№ п/п	Тип шлюза	№ опыта	Напор в м H_n	Начальная глубина в камере в м h_k	Скорость подъема затвора водопроводных галлерей в м/мин $v_з$	Высота подъема затвора водопроводных галлерей в м $h_з$	Время подъема затвора водопроводных галлерей в сек. t_0	Время опорожнения камеры в сек. T	Максимальное продольное давление в т $D_{прод}$	Время, соответствующее максимальному продольному давлению, от начала опорожнения в сек. $t'_{прод}$	Максимальное поперечное давление в т $D_{поп}$	Время, соответствующее максимальному поперечному давлению, от начала опорожнения в сек. $t''_{поп}$	Грузоподъемность судна в т W	Расстояние судна от обреза нижней головы в м l
1	I	229	6,00	1,50	0,50	2,00	237	338	0,50	69	0,09	183	300	25
2	I	227	6,00	1,50	0,50	2,00	237	338	0,50	53	0,12	185	300	25
3	I	226	6,00	1,50	0,50	2,00	245	340	0,50	34	0,19	216	300	25
4	IIв	32	9,55	5,50	0,53	4,00	450	767	0,85	450	1,60	520	4 200	120
	IIв	26	9,55	5,50	0,53	4,00	450	767	0,85	450	0,20	495	4 200	120
5	IIв	25	9,55	5,50	0,53	4,00	447	761	0,85	550	2,20	492	4 200	120
6	IIв	15	9,55	5,50	0,53	4,00	441	755	0,85	403	2,20	515	4 200	100
7	IIв	22	9,55	5,50	0,53	4,00	454	767	1,20	515	5,40	540	4 200	100
8	IIв	23	9,55	5,50	0,53	4,00	447	761	2,50	447	9,81	500	4 200	100
9	IIг	150	6,00	5,50	0,64	3,85	353	785	2,00	143	0,10	353	4 000	50
10	IIг	152	6,00	5,50	0,64	3,85	359	779	2,00	217	0,75	359	4 000	50
11	IIе	117	5,90	3,60	0,64	3,85	343	736	0,60	147	0,75	258	1 000	50
12	IIе	116	5,90	3,60	0,64	3,85	378	755	0,70	283	0,60	360	1 000	50
13	IIе	115	5,90	3,60	0,64	3,85	362	749	1,00	221	0,70	364	1 000	50
14	IIе	107	5,90	3,60	0,64	3,85	362	749	0,60	151	0,50	320	1 000	100
15	IIе	106	5,90	3,60 [1]	0,64	3,85	353	736	0,60	157	0,40	380	1 000	100
16	III	43	13,00	5,50	0,64	4,50	419	785	1,50	271	1,50	292	4 000	60
17	III	42	13,00	5,50	0,64	4,50	416	785	1,50	256	2,25	298	4 000	60
18	III	45	13,00	5,50	0,64	4,50	419	785	1,50	266	2,25	297	4 000	60
19	III	113	17,10	1,40	0,05	1,00	1 191	3 591	1,00	861	1,10	942	1 000	175
20	III	114	17,10	1,40	0,05	1,00	1 188	3 572	1,00	1 188	2,00	1 300	1 000	175
Опорожнение верхней камеры. Судно в нижней камере														
21	IVб	12	20,04	5,50	0,55	4,00	438	639	3,70	438	1,25	340	4 200	10 [2]
22	IVб	6	20,04	5,50	0,55	4,00	435	636	3,70	447	1,50	282	4 200	10
23	IVб	10	20,04	5,50	0,55	4,00	435	633	3,80	435	1,75	415	4 200	10
Опорожнение верхнего отсека камеры. Судно в нижнем отсеке камеры														
24	IIг	67	6,00	5,50	0,64	3,85	362	467	1,50	248	2,25	281	4 200	20 [3]
25	IIг	68	6,00	5,50	0,64	3,85	362	464	1,80	231	1,50	372	4 200	20
26	IIг	69	6,00	5,50	0,64	3,85	359	467	2,00	256	1,75	299	4 200	20

[1] Нижний подходный канал имеет глубину 2,5 м (местное заглубление).
[2] От массива с трубами.
[3] От обреза промежуточной головы.

Таблица 29

№ п/п	Тип шлюза	№ опыта	Напор H_n в м	Начальная глубина в камере h_k в м	Скорость подъема затвора $v_з$ в м/мин	Высота подъема затвора $h_з$ в м	Время подъема затвора t_0 в сек.	Время опорожнения камеры T в сек.	Максимальное давление на судно в т: продольное $D_{прод}$	поперечное $D_{поп}$: на носу	на корме	Расстояние судна от обреза нижней головы l в м
1	IIб	39	9,55	5,50	0,53	4,00	450	764	3,80	10,90	9,81	60
2	IIб	38	9,55	5,50	0,53	4,00	460	770	3,40	20,10	16,90	60
3	IIб	48	9,55	5,50	0,53	2,00	227	1 291	2,10	8,10	3,30	60
4	IIб	51	9,55	5,50	0,53	2,00	233	1 305	2,10	8,70	4,90	60
5	IIб	53	9,55	5,50	0,53	2,00	233	1 305	2,10	3,30	2,70	60
6	III	49	13,00	5,50	0,64	4,50	419	785	8,90[1]	14,40	9,60	60
7	III	55	13,00	5,50	0,64	4,50	419	782	8,60	14,40	9,60	60
8	III	57	13,00	5,50	0,64	4,50	422	785	8,30	14,40	8,90	60
9	III	53	13,00	5,50	0,64	1,50	145	1 758	8,60	7,30	4,20	60
10	III	56	13,00	5,50	0,64	1,50	145	1 758	8,30	5,40	2,70	60
11	III	58	13,00	5,50	0,64	1,50	141	1 758	8,00	2,30	1,50	60

[1] Предел показаний прибора Маккавеева в условиях производства опытов.

Кроме указанных задач необходимо было попутно решить вопрос о форме водопроводных галлерей для получения плавного (без отжимов — без дополнительных сопротивлений) течения в них потока, а также определить давление за затворами водопроводных галлерей.

Первая часть задачи была разрешена построением очертания галлерей по формуле проф. Миловича[1] и поверкой их экспериментальным путем.

Вторая задача была разрешена расчетным путем по нижеизложенному методу.

В результате произведенного расчета были получены следующие основные геометрические размеры галлерей шлюзов (табл. 30).

Полученное минимальное пьезометрическое давление за щитом водопроводных галлерей для расчетных случаев видно из табл. 31.

Что касается условий опорожнения верхних или наполнения нижних камер двухкамерных шлюзов, то здесь все элементы подбирались изложенным выше способом и значения их также показаны в вышеприведенных таблицах.

в) Обработка результатов опытов

Результаты проведенных опытов, кратко изложенные выше, были использованы при проектировании шлюзов канала.

Для выяснения гидравлических элементов процесса наполнения или опорожнения шлюзных камер была предпринята обработка опытных данных по специально разработанному для этой цели графо-аналитическому способу[2].

Сущность принятого графо-аналитического метода обработки хронограмм заключается в следующем.

На хронограммах, полученных при помощи прибора Маккавеева, обычно имеются три кривые, показывающие подъем (или опускание) реи, кормы и центра тяжести подвергаемого исследованию судна (образец см. фиг. 102) при наполнении (или опорожнении) шлюзной камеры.

Рассматривая судно как поплавок, можно для суждения о подъеме воды в камере шлюза воспользоваться кривыми для реи или для центра тяжести.

Так как по горизонтали мы имеем время (на модели), то здесь получаем зависимость между высотой сливной призмы (h_t) и временем (t).

[1] А. Я. Милович, Основы динамики жидкости, 1933.

[2] Работа эта была проведена под руководством сотрудника гидротехнической лаборатории Строительства инж. В. Ф. Тейтельман к моменту пуска и опробования канала.

Таблица 30

№ п/п	Тип шлюза	Расчетная отметка горизонта верхнего бьефа	Расчетная отметка горизонта нижнего бьефа	Отметка дна камеры	Расчетные отметки и размеры входных отверстий				Расчетные отметки и размеры отверстий, перекрываемых затворами				Расчетные отметки и размеры выходных отверстий			
					отметки нижней кромки	отметки верхней кромки	ширина в м	суммарная площадь [1] в м²	отметки нижней кромки	отметки верхней кромки	ширина в м	суммарная площадь [1] в м²	отметки нижней кромки	отметки верхней кромки	ширина в м	суммарная площадь [1] в м²
1	I	116,00	110,00	108,50	106,70	108,36	1,50	9,00	106,70	108,70	2,00	7,91	106,40	108,00	1,50	9,00
2	IIа	146,06	136,91	131,41	130,21	133,21	3,00	41,28	129,36	133,36	4,00	31,64	129,35	132,86	3,00	41,28
3	IIб	122,75	114,00	108,50	107,30	110,80	3,00	41,28	107,00	111,00	4,00	31,64	106,50	110,00	3,00	41,28
4	IIв	107,18	97,63	92,13	91,13	94,63	3,00	41,28	90,13	94,13	4,00	31,64	90,13	93,63	3,00	41,28
5	IIг	109,00	103,00	97,50	96,30	98,50	3,00	25,90	96,30	100,00	3,00	22,85	96,20	98,50	3,00	25,90
6	IIд	128,89	119,70	114,20	113,00	116,50	3,00	41,28	112,00	116,20	4,00	31,64	112,20	105,70	3,00	41,28
7	IIе	84,00	78,00	75,00	73,50	75,70	3,00	25,90	73,25	77,10	3,00	22,85	73,00	75,20	3,00	25,90
8	IIж	154,40	145,40	139,90	138,70	142,20	3,00	41,28	137,85	141,85	4,00	31,64	137,83	141,35	3,00	41,28
9	III	80,00	77,00	61,50	60,00	63,50	4,00	55,28	59,70	64,20	4,50	40,14	59,40	62,40	4,00	47,28
10	IVа	106,88	99,00	92,50	91,30	94,80	3,00	41,28	91,00	95,00	4,00	31,64	90,50	94,80	3,00	41,28
11	IVб	116,13	106,27	100,77	99,57	103,07	3,00	41,28	99,27	103,27	4,00	31,64	98,77	102,27	3,00	41,28
					Для средних голов											
12	IVа	114,95	98,00	92,50	92,87	96,87	3,00	47,28	92,68	96,87	4,00	31,64	92,68	96,87	3,00	47,28
13	IVб	126,31	106,27	100,77	101,14	105,14	3,00	47,28	100,95	104,95	4,00	31,64	100,77	104,77	3,00	47,28

[1] Суммарная площадь входных и выходных отверстий составляется из четырех отверстий; суммарная площадь расчетных сечений составляется из двух отверстий.

Таблица 31

№ п/п	Тип шлюза	Исследованный режим работы шлюза	Постоянные элементы шлюзов							Гидравлические элементы шлюзов, подсчитанные графо-аналитическим путем на основе опытных данных								
			полный напор H в $м$	напор на ворота $H_в$ в $м$	площадь зеркала Ω в $м^2$	объем сливной призмы W в $м^3$	площадь сечения в момент полного открытия затвора ω_a в $м^2$	скорость подъема затвора v_3 в $м/мин$	время подъема затвора t_0 в сек.	коэфициент в формуле, увеличенный в 1 000 раз, a	коэфициент расхода μ_0	полное время наполнения или опорожнения камеры T в сек.	максимальный расход q_{max} в $м^3/сек$	момент наступления t_{kp}	максимальная скорость подъема или опускания горизонта воды в камере u в $м/сек$	максимальная скорость в расчетном сечении водопроводной галлереи c_p в $м/сек$	максимальная скорость в выходном отверстии водопроводной галлереи $c_в$ в $м/сек$	минимальное пьезометрическое давление за затворами водопроводной галлереи[2] $\frac{p}{\gamma}$ в $м$
1	IIб	Наполнен	8,75	6,94	10 500	92 000	54,00	0,20	540	0,996	0,538	750	211,60	350	0,020	—	—	—
2	IIв	Опорожнен	9,55	9,55	10 380	99 000	31,64	0,53	453	1,807	0,819	778	222,75	420	0,022	7,05	5,40	—0,8
3	IIг	Наполнен верхний отсек . .	6,00	5,90	4 767	28 600	36,00	0,20	360	1,422	0,512	462	97,24	260	0,020	—	—	—
4	IIг	Опорожнен верхний отсек .	6,00	6,00	4 767	28 600	22,85	0,633	365	2,279	0,832	455	92,70	260	0,019	4,06	3,58	[1]
5	IIг	Наполнен	6,00	5,90	10 400	62 400	36,00	0,16	452	1,383	0,625	744	157,56	410	0,015	—	—	—
6	III	Наполнен	13,00	8,20	10 580	137 500	60,00	0,20	604	0,912	0,551	820	275,00	450	0,026	—	—	—
7	III	Опорожнен	13,00	13,00	10 015	130 200	40,14	0,64	423	1,837	0,777	759	319,00	350	0,032	7,95	6,75	—1,5
8	IVa	Наполнена нижняя камера .	17,95	9,07	10 780	95 700	31,64	0,55	436	1,950	0,850	610	267,00	340	0,025	8,50	5,65	—6,0
9	IVб	Наполнен	10,18	6,21	10 470	106 500	54,00	0,20	540	1,032	0,557	790	225,00	450	0,022	—	—	—
10	IVб	Опорожнена верхняя камера	20,04	10,18	10 470	106 500	31,64	0,55	436	1,791	0,781	645	274,00	340	0,026	8,68	5,80	—4,5

[1] Для опорожнения верхнего отсека шлюза типа IIг расчет не проводился.

[2] Значение $\frac{p}{\gamma}$ получено расчетом применительно к опытному значению коэфициента расхода.

Прибор Маккавеева дает значения h_t в определенном масштабе; чтобы исключить неточность масштаба, мы вводим безразмерные ординаты:

$$\alpha_t = \frac{h_t}{H}, \tag{49}$$

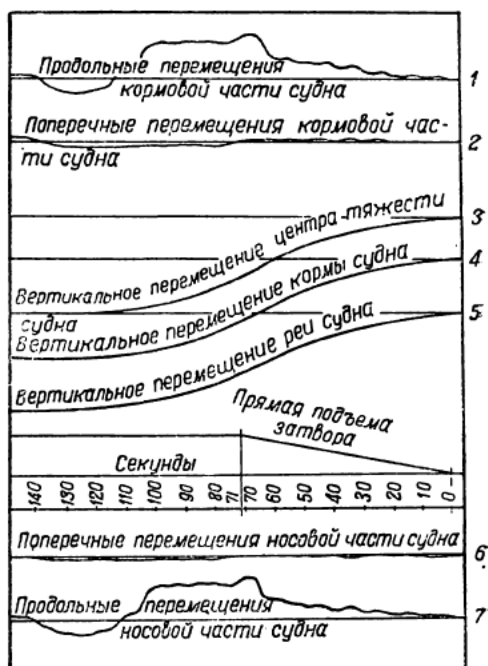
где h_t — высота части сливной призмы, налитой (или вылитой) за время t;
H — полный напор шлюза (разность бьефов).

Значения h_t и H берем по кривой (хронограмм), а t определяем по закону подобия, где

$$t_{мод} = t_{нат} \sqrt{\frac{1}{\lambda}}$$

(λ — масштаб модели).

Для уточнения результатов (там, где это было возможно) было взято среднее из нескольких хронограмм (или из лучших хронограмм).



Фиг. 102. Образец хронограммы элементов, характеризующих условия отстоя судов, полученной на приборе Маккавеева (опыт № 106). Судно в 18 000 *т* на расстоянии 10,0 *м* от начала шкафа. Напор $H = 9{,}55$ *м*. Глубина в нижнем бьефе 5,50 *м*. Подъем затворов со скоростью $v = 0{,}53$ *м/мин*; высота подъема затвора $h = 4{,}00$ *м*; время подъема затворов в модели $t = 71''$, в натуре $t = 7'27''$; время опорожнения камеры в модели $T = 121'5''$; в натуре $T = 12'44''$. Наибольшее давление на судно: $D_{прод} = 12{,}4$ *т*; $D_{поп} = 1{,}9$ *т*:

Полученные результаты подсчета $\alpha_t = f(t)$ были нанесены на график (см. прилагаемую в качестве образца фиг. 103). Сток воды из камеры (или в камеру) до данного момента равен:

$$Q_t = \Omega h_t,$$

где Ω — площадь зеркала шлюза,
или

$$Q_t = \Omega H \frac{h_t}{H}.$$

Так как $W = \Omega H$ (полная сливная призма шлюза), причем

$$\frac{h_t}{H} = \alpha_t, \tag{50}$$

то

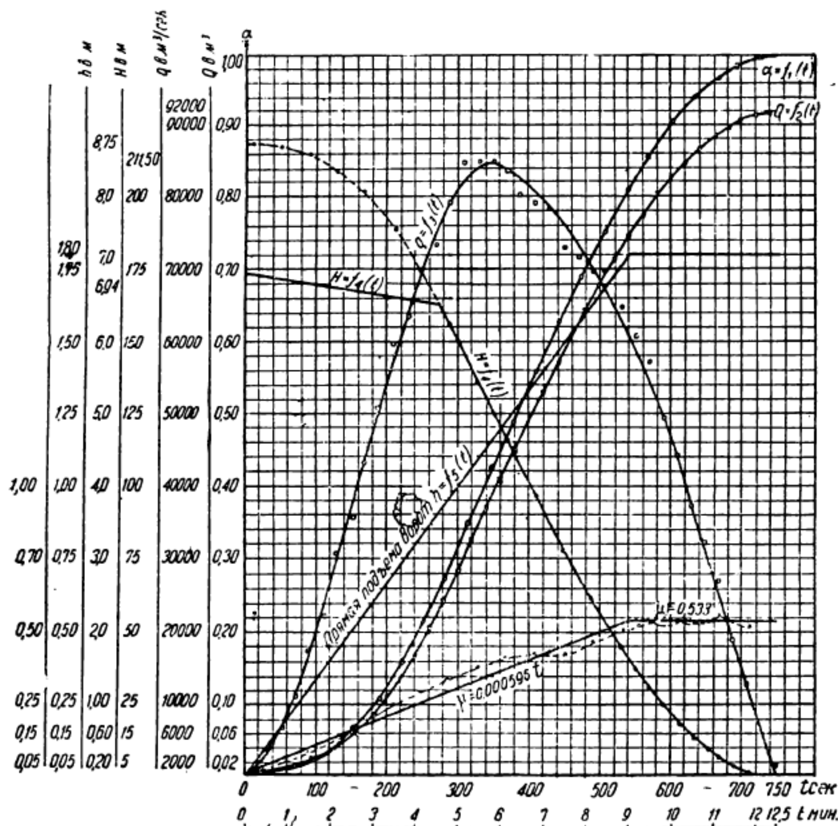
$$Q = \alpha_t W.$$

Это дает возможность построить кривую зависимости:

$$Q_t = f_1(t).$$

Если принять бесконечно-малый промежуток времени dt, то за это время сток будет dQ. Расход воды в единицу времени составит:

$$q_t = \frac{dQ}{dt}.$$



Фиг. 103. Универсальная гидравлическая характеристика наполнения камеры типового шлюза, полученная на основе обработки опытных данных. Скорость подъема затвора $v_з = 0{,}20$ *м/мин*; высота $h = 1{,}80$ *м*; напор шлюза $H = 8{,}75$ *м*; напор на ворота $H_в = 6{,}94$ *м*, начальная глубина в камере $h_k = 5{,}50$ *м*; время наполнения камеры $T = 750$ сек.;

1 — отношение $\frac{h_t}{H_н} = v$; 2 — сток воды Q в $м^3$; 3 — расход воды q в $м^3/сек$; 4 — напор H в $м$; 5 — коэфициент расхода μ_t

Вследствие отсутствия аналитического выражения для $Q_t = f_1(t)$ можно воспользоваться графиком, определяя $q_t \approx \frac{\Delta Q}{\Delta t}$ графо-аналитическим путем, т. е.

$$q_t = \frac{\alpha_t'' - \alpha_t'}{t'' - t'} W, \tag{51}$$

где t' и t'' — два близко взятых значения t и

α'_t и α''_t — два соответственных t' и t'', взятых с графика значения α_t.

Здесь q_t отнесено к моменту:

$$t = \frac{t' + t''}{2}.$$

Для случая опорожнения камеры шлюза или наполнения через водопроводные галлереи напор в любой момент времени может быть вычислен также по значению α_t.

Так как

$$H_t = H - h_t,$$

то

$$H_t = H\left(1 - \frac{h_t}{H}\right)$$

или

$$H_t = H(1 - \alpha_t). \quad (52)$$

В случае наполнения камеры через ворота верхней головы следует рассматривать три различных величины напора над отверстием:

1. Истечение в атмосферу, когда

$$H_t > \left(H_в - \frac{vt'_0}{2}\right),$$

где t'_0 — время, необходимое, чтобы подтопить центр тяжести щели под воротами;

v — скорость подъема ворот в *м/сек*.

В этом случае напор в любой момент времени будет зависеть не от полного напора шлюза, а только от высоты уровня верхнего бьефа над королем шлюза и скорости подъема ворот. Так как радиусы ворот взяты довольно значительные, то можно пренебречь дугой, считая ее прямой линией; тогда напор над центром тяжести отверстия будет:

$$H_t = H_в - \frac{vt}{2}, \quad (52')$$

где $H_в$ — полный напор на ворота в *м*; остальные значения — прежние.

2. Истечение через полузатопленное отверстие, когда затоплена только часть струи. Это положение длилось лишь ничтожный промежуток времени и потому не рассматривалось.

3. Истечение при переменном напоре и при затопленном отверстии.

Настоящее положение имело место в течение большей части времени при наполнении шлюза. Здесь H_t может быть определено по уравнению (52).

Открытие затворов водопроводных галлерей и подъем ворот верхней головы производились с постоянной скоростью по вертикали.

Построение прямой $h_s = f(t)$, когда $0 < t < t_0$ (где t_0 — время открытия затвора), выполнялось по уравнению:

$$h_s = vt, \quad (53)$$

где v — скорость подъема затвора в *м/сек*.

При $t_0 < t < T$, где T — полное время наполнения или опорожнения камеры:

$$h_s = h_0 = \text{const}.$$

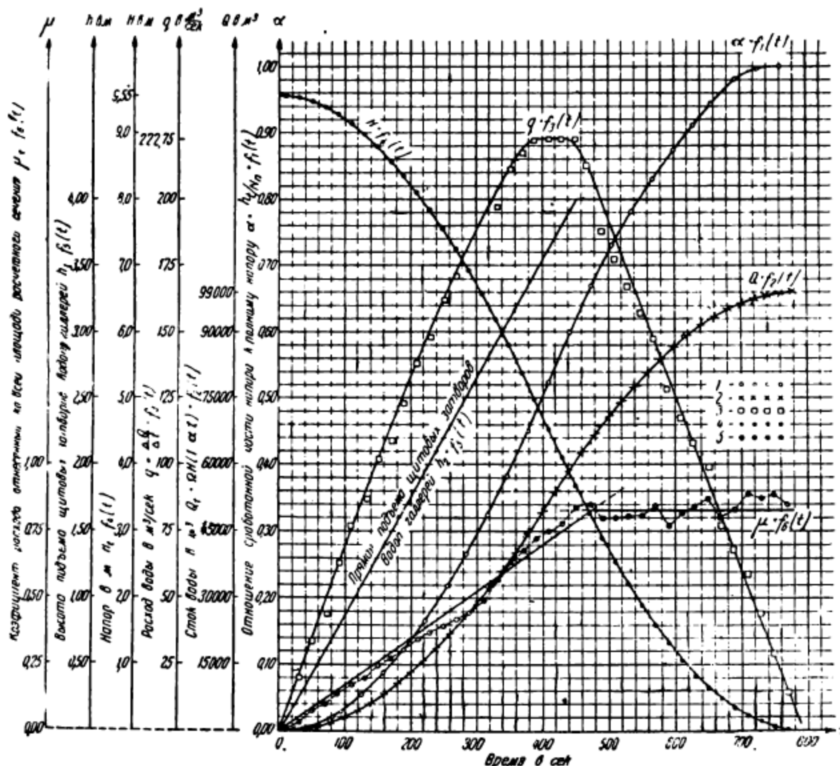
Фактическая высота щели $h_ф$ для верхних ворот несколько отличается (особенно в первые моменты времени после открытия) от $h_з$ по вертикали. Однако ввиду незначительной разницы между $h_ф$ и $h_з$ (вследствие больших размеров радиуса ворот) мы всюду считали

$$h_ф = h_з.$$

Перечисленные элементы дают возможность в каждый момент времени определить коэфициент расхода.

Вычисление проводим в двух предположениях:

1. Коэфициент расхода μ_t отнесен к постоянному поперечному сечению, получающемуся в момент времени t_0 при полном открытии ворот, т. е. к ω_0.



Фиг. 104. Универсальная гидравлическая характеристика для опорожнения типового шлюза, полученная на основе обработки опытных данных. Скорость подъема затвора $v_з = 0{,}53$ *м/мин*; высота $h = 4{,}00$ *м*; напор шлюза $H = 9{,}55$ *м*; начальная глубина в камере $h_k = 5{,}5$ *м*; время наполнения камеры $T = 778$ сек.;

1 — отношение $\frac{h_t}{H_n} = \alpha$; *2* — сток воды Q в $м^3$; *3* — расход воды q в $м^3/сек$; *4* — напор H в *м*; *5* — коэфициент расхода μ_t.

2. Коэфициент расхода μ'_t отнесен к фактически работающей площади отверстия в рассматриваемый момент времени, т. е. к ω_t.

Так как

$$q_t = \mu_t \omega_0 \sqrt{2gH_t},$$

то

$$\mu_t = \frac{q_t}{\omega_0 \sqrt{2gH_t}}$$

и

$$\mu'_t = \frac{q_t}{\omega_t \sqrt{2gH_t}}$$

или

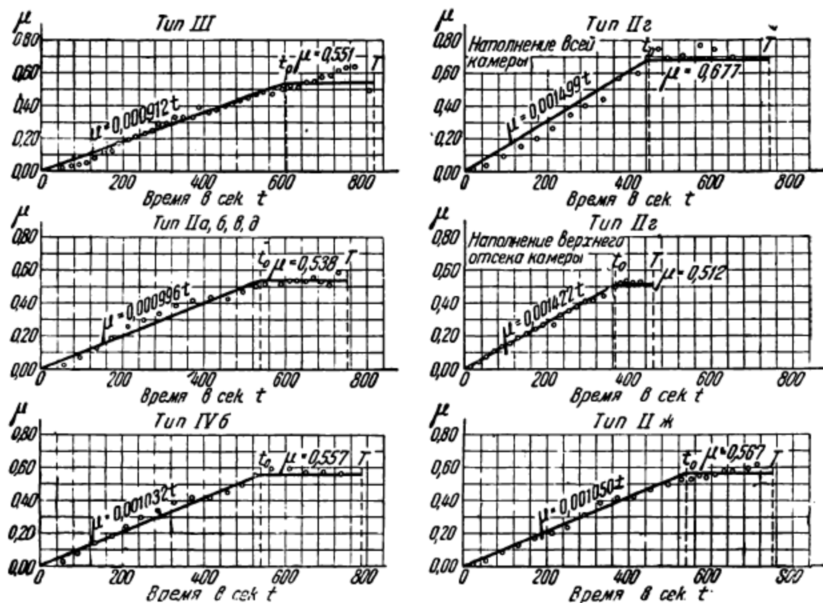
$$\mu_t' = \frac{1}{\omega_t \sqrt{2g}} \cdot \frac{q_t}{\sqrt{H_t}}$$

и

$$\mu_t' = \frac{1}{bv\sqrt{2g}} \cdot \frac{q_t}{t\sqrt{H_t}}.$$

На графиках гидравлических характеристик приводились только

$$\mu_t = f(t).$$



Фиг. 105. Зависимости коэфициентов расходов по времени, полученные графо-аналитическим подсчетом по опытным данным по уравнению $\mu_t = \frac{q_t}{\omega_0\sqrt{2g\,H_t}}$ и по линейному закону для:

$$0 < t < t_0 \quad \mu_t = at \text{ и } t_0 < t < T \quad \mu_t = at_0 = \text{const}.$$

Типы шлюзов	III	II а, в, д	IV б	II г наполнение всей камеры	II г наполнение верхнего отсека	II ж
Напор шлюза H в $м$	13,00	8,75	10,18	6,00	6,00	9,00
» на ворота $H_в$ в $м$	8,20	5,94	6,21	5,90	5,90	6,20
Полная высота подъема ворот $h_в$ в $м$	2,00	1,80	1,80	1,20	1,20	1,80
Скорость v в $м/мин$	0,20	0,20	0,20	0,16	0,20	0,20
Время t в сек.	604	540	540	452	360	540
Время наполнения камеры T в сек.	820	750	790	744	462	762

Примечания. 1. Значение коэфицинта расхода μ_t отнесено к постоянному сечению ω_0, соответствующему полному открытию ворот в момент t_0, т. е. $\omega_0 = bvt_0$.

2. Значение a в формуле $\mu_t = at$ определено методом наименьших квадратов по опытным данным.

Так как данные о $\mu_t = f(t)$ показывают, что здесь можно предположить линейную зависимость для случаев:

$$0 < t < t_0 \qquad \mu_t = at;$$

$$t_0 < t < T \qquad \mu_t = at_0 = \text{const},$$

то обработку опытных значений μ_t производим по способу наименьших квадратов, т. е. чтобы

$$\sum (\mu_{оп} - \mu_{выч})^2 = \min$$

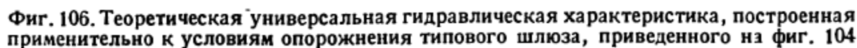
или

$$\sum_{i=1}^{i=n_1} (\mu_i - at_i)^2 + \sum_{i=n_1}^{i=n} (\mu_i - at_0)^2 = \min,$$

где n — общее число точек;

n_1 — число точек до момента t_0;

n_2 — » » от t_0 до T.



Фиг. 106. Теоретическая универсальная гидравлическая характеристика, построенная применительно к условиям опорожнения типового шлюза, приведенного на фиг. 104

Это дает нам после диференцирования следующую формулу:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \mu_i t_i + t_0 \sum_{i=n_1}^{i=n} \mu_i}{\sum_{i=1}^{i=n_1} t_i^2 + n_2 t_0^2}.$$

Значение t_0 при этом определяем как среднее из опытных данных.

Практически $t_0 = \frac{h_0'}{v_з}$ (расхождение на модели 0,5 — 1,0 сек.).

Указанным графо-аналитическим способом были обработаны хронограммы опытов над окончательными вариантами шлюзов, испытанных в лаборатории.

Основные гидравлические элементы, полученные в результате этой обработки, указаны в табл. 30.

В качестве примера на фиг. 103 и 104 приведены универсальные гидравлические характеристики. Для наполнения шлюза №3 (типового) и для опорожнения шлюза №.2 (типового) на фиг. 105 помещены сведенные графики для коэфициентов расходов и на фиг. 106 — универсальная гидравлическая характеристика, построенная теоретическим путем для случая опорожнения шлюза № 2; там же показаны опытные точки для сравнения.

г) Методика гидравлического расчета шлюзов

Для всех шлюзов канала, подвергнутых лабораторному исследованию, были сделаны гидравлические расчеты с целью выяснения общего режима потока и определения размеров отдельных элементов шлюза.

Методика расчета была разработана в основном по данным, имевшимся по этому вопросу в литературе.

Гидравлическому расчету подвергались: площади сечения обходных водопроводных галлерей шлюзов и величина давлений за затворами (в частности условие возникновения за затворами кавитации).

Все расчеты проводились для случаев опорожнения (через обходные галлереи) нижних и средних (для двухкамерных шлюзов) голов шлюзов канала.

1) Опорожнение нижних камер шлюзов

За бесконечно-малый промежуток времени dt элементарный сток будет:

$$dQ = -\Omega\, dH;$$

с другой стороны:

$$dQ = \mu_t\, \omega_0 \sqrt{2 g H_t} \cdot dt.$$

Таким образом основное диференциальное уравнение для рассматриваемого явления будет[1]:

$$-\Omega\, dH = \mu_t\, \omega_0 \sqrt{2 g H_t} \cdot dt,$$

откуда

$$\omega_0 = \frac{2\Omega \sqrt{H}}{\sqrt{2 g H_t} \cdot \int\limits_0^t \mu_t\, dt}. \tag{54}$$

Здесь ω_0 — суммарная площадь сечения водопроводных галлерей в $м^2$;
H — полный напор шлюза в $м$;
Ω — средняя площадь зеркала, равная сливной призме (ω_0), деленной на полный напор[2], т. е. $\Omega = \frac{\omega_0}{H}$ в $м^2$;
T — полное время опорожнения камеры в сек.;
g — ускорение силы тяжести, равное 9,81 $м/сек^2$;
μ_t — коэфициент расхода, отнесенный к полностью открытому сечению водопроводных галлерей (ω_0) в момент времени t.

Если представить зависимость $\mu_t = f(t)$ в виде графика, то фигурирующий в уравнении (54) $\int\limits_0^t \mu_t\, dt$ может быть определен как площадь по графику.

---

[1] Без учета силы инерции.

[2] Фактически Ω также величина переменная, так как стены шлюза имеют уклон $^1/_{20}$. Незначительность уклона позволяет взять $\Omega_{ср}$ по указанной формуле.

Величины Ω, H и T заданы для каждого шлюза; поэтому ω_0 может быть определено из уравнения (54) подбором.

При расчете была принята следующая схема:

1. Задаваясь размерами водопроводных галлерей и их очертанием, нужно было определить гидравлические сопротивления для любого момента времени.

Коэфициент расхода определялся как

$$\mu_t = \frac{1}{\sqrt{\Sigma \xi}},$$

где $\Sigma\xi$ — сумма всех сопротивлений.

Обозначая суммарный коэфициент сопротивления на участках до затвора и после затвора через ξ_c (постоянная часть суммы сопротивления) и коэфициент сопротивления затвора через ξ_t (переменная часть суммы сопротивления, зависящая от времени), получим:

$$\mu_t = \frac{1}{\sqrt{\xi_c + \xi_t}}. \qquad (55)$$

Постоянная часть суммы сопротивлений (ξ_c) определяется существующими в справочной литературе данными.

При полном открытии затворов, когда $\xi_t = 0$:

$$\mu_0 = \frac{1}{\sqrt{\xi_c}}.$$

Переменная часть суммы сопротивлений была определена для каждого отдельного открытия по формуле, получающейся из сравнения уравнений Борда-Карно для внезапного расширения струи и уравнения Вейсбаха, т. е.:

$$\xi_t \frac{v_t^2}{2g} = \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g}, \qquad (56)$$

где v_t — скорость в сжатом сечении в *м/сек*;

v_2 — скорость в сечении, где струя снова расширяется до полной высоты отверстия.

В соответствии с формулой (56), обозначая:

φ — коэфициент сжатия;

t_0 — время подъема затвора;

t — рассматриваемый момент времени;

$$x = \frac{t}{t_0} = \frac{a}{a_0},$$

получаем после некоторых преобразований[1]:

$$\xi_t = \left(\frac{1}{\varphi x} - 1\right)^2. \qquad (57)$$

Таким образом вместо формулы (54) можно получить (учитывая, что $dt = t_0 dx$):

$$\omega_0 = \frac{2\Omega\sqrt{H}}{\sqrt{2g}\cdot t_0}\cdot\frac{1}{\int\limits_0^T \frac{dx}{\sqrt{\xi_c + \left(\frac{1}{\varphi x} - 1\right)^2}}}. \qquad (58)^{2}$$

Значение коэфициента сжатия струи определялось по Мизесу, что давало возможность построить график изменения $\mu_t = f(x)$, т. е. зависимость μ_t от степени открытия $\left(x = \frac{a}{a_0} = \frac{t}{t_0}\right)$ затвора.

[1] Для случая равномерного подъема затвора.

[2] Уравнение (58) не решается точно в квадратурах, и поэтому при расчете был использован графический метод приближенного вычисления интеграла.

Для удобства вычисления интеграла при разных значениях было сделано преобразование:

$$\int_0^T \mu_t\,dt = t_0 \int_0^{x_T} \mu_t dx = t_0\left(\int_0^1 \mu_0 dx + \int_1^{x_T} \mu_t dx\right). \qquad (59)$$

А так как

$$t_1 = t_0,\ \mu_t = \mu_0 = \text{const},$$

то

$$\int_1^{x_T} \mu_t\,dx = \mu_0(x_T - 1).$$

Обозначив

$$J_2 = \int_0^1 \mu_t\,dx$$

(этот интеграл определялся графически), получим:

$$\int_0 \mu_t\,dt = t_0 J_2 - \mu_0 T - \mu_0 t_0.$$

Поэтому

$$w_0 = \frac{2\,\Omega\sqrt{H}}{\sqrt{2g}\cdot t_0}\cdot\frac{1}{\mu_0 T - \mu_0 t_0 - J_2 t_0}. \qquad (58')[1]$$

Определив графически J_2, можно было найти и ω_0 для любого значения t_0.

2. Так как для подсчета значения J_2 и μ_0 предварительно пришлось задаваться ω_0, то уравнение (58′) решалось методом постепенного приближения.

3. Построив модель по данным, полученным из расчета, лаборатория определяла, насколько совпадает время опорожнения на модели (переведенное в натуру T) с теоретическим его значением, причем значение T определялось по известной формуле Винкеля [2]:

$$T = t_0\left(1 - \frac{\mu_{cp}}{\mu_0} + \frac{2\,\Omega\sqrt{H}}{\mu_0\,\omega_0\sqrt{2g}}\right), \qquad (60)$$

где μ_{cp} — средний коэфициент расхода за время подъема затвора $\left(\text{из опытов получено значение } \frac{\mu_{cp}}{\mu_0} = 0{,}5\right)$.

4. Расчет проводился параллельно с опытами, так как значение t_0—времени подъема затвора или, что то же, $v_3 = \frac{d_0}{t_0}$, определялось только экспериментально из условий шлюзования судов.

2) Наполнение нижней камеры или опорожнение верхней камеры двухкамерных шлюзов

Считая площади камер одинаковыми, получим основное диференциальное уравнение для этого случая в виде элементарного стока за бесконечно-малый промежуток времени dt:

$$dQ = -\frac{1}{2}\,\Omega\,dH = \mu_t\,\omega_0\sqrt{2gH_t}\cdot dt$$

или

$$\frac{\Omega}{2\,\omega_0\sqrt{2g}}\int_H^0 -\frac{dH}{\sqrt{H}} = \int_0^T \mu_t\,dt,$$

[1] Расчет проводился инж. В. Н. Шимко и И. Н. Дымент.

[2] Richard Winkel, Die Grundlagen der Flussregelung, Berlin 1934, стр. 50—66.

т. е.

$$\omega_0 = \frac{\Omega \sqrt{H}}{\sqrt{2g}} \cdot \frac{1}{\int\limits_0^T \mu_t \, dt}. \qquad (61)$$

В уравнении (61) $\int\limits_0^T \mu_t \, dt$ определялся согласно методу, изложенному выше, причем

$$\frac{\Omega \sqrt{H}}{\sqrt{2g} \cdot t_0} \cdot \frac{1}{\mu_0 T - \mu_0 t_0 + J_2 t_0} = \omega_0. \qquad (61')$$

Расчет элементов питания средних голов двухкамерных шлюзов проводился аналогично расчету нижней головы шлюза, т. е. при параллельном экспериментировании в лаборатории.

д) Установление условий возникновения кавитации за затворами водопроводных галлерей

Явления кавитации имеют место при образовании в потоке пространств с давлением, значительно меньшим атмосферного. Это явление сопровождается обычно повреждением, а иногда и разрушением поверхностей, расположенных вблизи места образования кавитации. Кавитация может иметь место при частичном открытии затворов водопроводных галлерей, когда (вследствие внезапного расширения потока) за затвором образуются пространства с пониженным давлением.

Для определения величины получаемого давления и разрушительного эффекта явления кавитации до настоящего времени нет достаточных теоретических и экспериментальных данных. Однако для случаев, когда давление за затвором больше абсолютного нуля и сопротивления могут быть высчитаны по обычным формулам, оно может быть определено теоретически.

В связи с этим ниже приводятся уравнения давления за затвором.

Сохраняя все ранее принятые обозначения (фиг. 107), можно написать два уравнения Бернулли для сечений $I - I$ и $II - II$ и сечений $II - II$ и $III - III$.

Здесь постоянная часть сопротивления галлереи разбита на: $\xi_c = \xi_в + \xi_н$, где индексы *в* и *н* обозначают соответственно «верхний» и «нижний» участки.

В этом случае уравнения Бернулли получаются в следующем виде:

1) $$y_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = y_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g}; \qquad (62)$$

2) $$y_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} = y_3 + \frac{P_3}{\gamma} + \frac{v_3^2}{2g} + \xi_н \frac{v^2}{2g}. \qquad (63)$$

Здесь y_1, y_2, y_3 — ординаты точек, лежащих у дна галлерей в выбранных сечениях;

v_1, v_2, v_3 — скорости в соответствующих сечениях;

v — скорость в расчетном сечении;

P_1, P_2, P_3 — давления в соответствующих сечениях.

При этом:

а) v_3 — скорость воды нижнего бьефа (может быть принято $v_3 = 0$);

б) значение $y_1 = y_2$ (для наших галлерей);

в) $\frac{P_3}{\gamma} + y_3 = y_н$ — ордината поверхности воды в нижнем бьефе и $y_2 + h_н = y_н$.

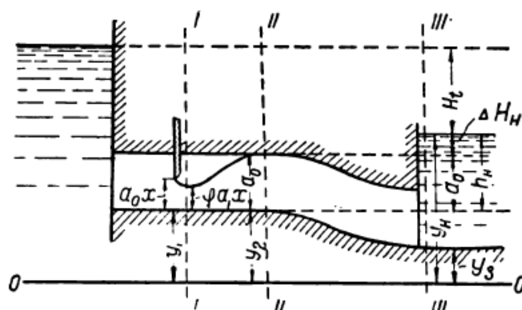
Поэтому

$$\frac{P_3}{\gamma} + y_3 = y_2 + h_н.$$

Из уравнений (62) и (63) после целого ряда преобразований[1] можно получить условие отсутствия кавитации в виде:

$$\frac{\xi_н - m^2 - 2m^2\sqrt{\xi_t}}{\xi_c + m^2\xi_t} H_t - \varphi a x + h_н > -10 \text{ м}. \quad (64)$$

С запасом для расчета в уравнении (64) было принято вместо — 10 только — 7 *м*.



Фиг. 107. Схематический разрез по оси галлереи шлюза

Для сопоставления расчетной формулы из общего диференциального уравнения имеем:

$$H_t = H\left(1 - \frac{\int_0^t \mu_t\,dt}{\int_0^T \mu_t\,dt}\right)^2. \quad (65)$$

Имея в виду, что $t = t_0 x$, где $x = \frac{t}{t_0}$, получим по уравнению (59):

$$H_t = H\left(1 - \frac{\int_0^x \mu_t\,dx}{\int_0^T \mu_t\,dx + \mu_0(x_T - 1)}\right)^2,$$

где $x_T = \frac{T}{t_0}$.

Обозначив

$$\eta = \frac{\xi_н - m^2 - 2m^2\sqrt{\xi_t}}{\xi_c - m^2\xi_t}; \; K_x = \frac{\int_0^x \mu_t\,dx}{\int_0^T \mu_t\,dx + \mu_0(x_T - 1)}; \; h_н = a_0 + \Delta H,$$

получим основное уравнение в виде:

$$\frac{P_1}{\gamma} = \eta H(1 - K_x)^2 + a_0(1 - \varphi x) + \Delta H. \quad (66)$$

[1] См. V. M. Makkaveeff, L'influence de la cavitation sur les rèsistances hydrauliques, «Comptes Rendus Congrèss Internat. de mècanique appliquè», Stokholm 1930, т. I, стр. 168—171.

Уравнение (66) дает возможность определить давление за затвором для всех случаев опорожнения камеры шлюза, где $\Delta H = \text{const}$. Для средних голов, где истечение проходит под переменным напором и под переменный уровень, последний член переменный и равен:

$$\Delta H_t = \Delta H_н + \frac{H - H_t}{2},$$

где $\Delta H_н$ — начальное затопление верхней кромки галлерей.

Проводя соответствующие подстановки, получим:

$$\Delta H_t = \Delta H_н + \frac{K_x H}{2}(2 - K_x)$$

или

$$\frac{P_1}{\gamma} = \eta H (1 - K_x)^2 + a_0 (1 - \varphi x) + \frac{K_x H}{2}(2 - K_x) + \Delta H_н. \qquad (67)$$

Формулы (66) и (67) являлись расчетными для установления возможности возникновения кавитации за затворами водопроводных галлерей. Расчет производился для нескольких значений μ_0 — коэфициента расхода с тем, чтобы установить зависимость

$$\frac{P_1}{\gamma} = f(\mu).$$

Эта работа была проделана для того, чтобы впоследствии для любого μ_0, которое будет получено из опытов, можно было установить $\frac{P_1}{\gamma}$ — давление за затвором.

Порядок расчета был принят следующий.

Для нескольких значений μ_0 были определены:

$\xi_c = \frac{1}{\mu_0^2}$, $\Sigma\xi = \xi_c + \xi_t = \frac{1}{\mu^2} + \left(\frac{1}{\varphi x} - 1\right)^2$ и $\xi_н$ — по эмпирическим формулам. Кроме того по этим же данным определялись для каждого открытия x и $\mu_t = \frac{1}{\sqrt{\Sigma\xi}}$.

Значение m было принято равным 1 применительно к галлереям шлюзов МВС. По полученным данным вычислялось значение η.

Значение K_x определялось графическим интегрированием.

Расчет производился для нескольких значений $x_T = \frac{T}{t_0}$, что позволило впоследствии найти минимальные значения $\frac{P_1}{\gamma} = f(x_T)$, т. е. от времени наполнения камеры и от времени подъема затвора.

Как уже указывалось выше, скорость подъема затвора, которая лимитируется условиями шлюзования, могла быть определена только экспериментально.

Весь расчетный материал был представлен в виде графиков, удобных для пользования.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОДХОДОВ К ШЛЮЗАМ

Цель лабораторных исследований подходов к шлюзам заключалась в подборе экспериментальным путем таких очертаний и размеров ковшей в месте сопряжения деривационных каналов и насосных станций с основным каналом, при которых забор воды насосными станциями (со стороны нижнего бьефа) и выпуск воды в канал (в верхнем бьефе) оказывали бы по возможности наименьшее влияние на условия движения судов в подходах к шлюзам.

Эта работа состояла из двух отдельных частей [1]:

1) исследования сопряжения отводящего (от насосных станций) деривационного канала с основным каналом при условии подхода судов к шлюзу со стороны верхнего бьефа и

2) исследования сопряжения подводящего (к насосной станции) канала с основным каналом при наличии подхода судов к шлюзу со стороны нижнего бьефа.

Все исследования производились на моделях в масштабе 1 : 40 натуральной величины.

Кроме того, поскольку условия отвода воды из канала на насосные станции предполагались одинаковыми и разница между ними заключалась только в длинах и расположении деривационных каналов, то указанная задача явилась типовой и была разрешена применительно к насосной станции у шлюза типа IIб. Исключение составлял лишь подход со стороны нижнего бьефа к насосной станции у шлюза типа IIд, где у начала деривационного канала с противоположной его стороны производился выпуск ближайшей речки. Поэтому низовой подход к насосной станции у шлюза типа IIд исследовался в индивидуальном порядке. В соответствии с этим построено и дальнейшее изложение.

а) Исследование типовых подходов к шлюзам

Для определения рациональных размеров и очертаний подходов к насосным станциям и шлюзам каждый подход со стороны верхнего и нижнего бьефов был исследован в нескольких (от 4 до 7) вариантах, причем оценка каждого варианта производилась по следующим характерным признакам:

1) по распределению скоростей течения (поверхностных и глубинных) в местах сопряжения деривационных каналов с основным каналом как в условиях свободного течения, так и при наличии пал;

2) по отклонениям траектории движения судов (носа и кормы) от линий судового хода в зоне упомянутых сопряжений каналов при наличии оградительных пал и без них. Для получения этих данных на моделях производилось протаскивание судов грузоподъемностью 6 000 *т* (133 × 19 × 3 *м*) и 18 000 *т* (187 × × 25 × 4,5 *м*), замоделированных в том же масштабе, со скоростями 0,20 — 0,45 *м/сек* (н. в.) при подходе к шлюзу и 0,3 — 0,8 *м/сек* — при движении судна от шлюза.

Все опыты производились в условиях установившегося движения при нормальных горизонтах (т. е. при глубине в судоходном канале 5,0 *м*) и пропуске через насосные станции расхода 175 $м^3/сек$ в предположении одновременной работы 7 агрегатов мощностью в 25 $м^3/сек$ каждый [2].

В результате произведенных исследований гидротехнической лабораторией Строительства канала были сделаны следующие выводы и предложения:

1. По сопряжению деривационного отводящего (от насосной станции) канала с основным каналом в пределах подхода к шлюзу со стороны верхнего бьефа:

а) Все исследованные варианты (кроме первого) как в гидравлическом отношении, так и в отношении влияния на условия судоходства, оказались примерно одинаковыми.

б) По экономическим соображениям лабораторией был рекомендован окончательный вариант (№ 4), обеспечивающий минимальный объем земляных работ. Общий вид этого варианта, принятого за окончательный, приведен на фиг. 108.

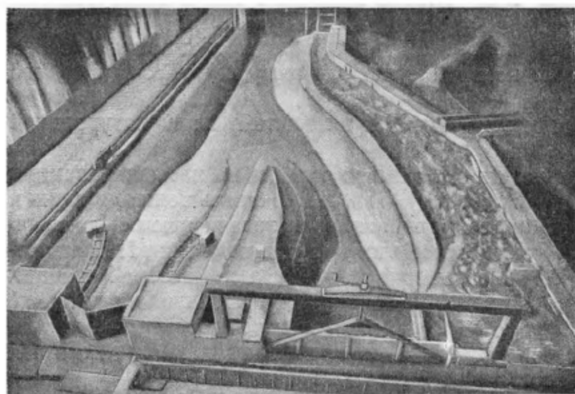
Исследование распределения поверхностных скоростей при пропуске через деривационный канал расхода 175 $м^3/сек$ показало, что при принятой форме сопряжения поток, выходящий из деривационного канала, плавно и равномерно распределяется по всей ширине судоходного канала.

---

[1] Исследования проводились под руководством инж. Н. А. Ржаницына.

[2] Впоследствии при сокращении числа агрегатов до 5 и расчетного расхода до 125 $м^3/сек$ все размеры подходов и деривационных каналов были соответственно уменьшены, руководствуясь принципами подобия; последняя работа была сделана теоретически, так как модели уже были разобраны.

В целях предохранения от навалки судов на откос канала, противоположный выпуску отводящего канала, лаборатория рекомендовала установить вдоль него оградительные сооружения в зоне сопряжения каналов.

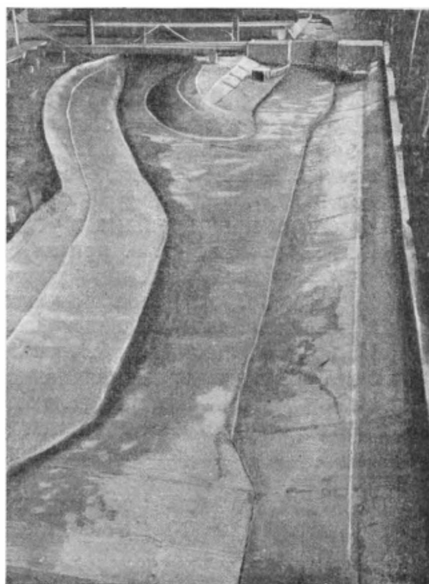


Фиг. 108. Общий вид модели подхода к шлюзу со стороны нижнего бьефа

2. По сопряжению деривационного подводящего (к насосной станции) канала с основным каналом в пределах подхода к шлюзу со стороны **нижнего бьефа**:

а) Путем постепенного подбора обтекаемых форм ковша, устанавливаемого в месте ответвления деривационного канала, после исследования пяти вариантов приемлемыми были признаны только два варианта, которые и были приняты за основу при проектировании (варианты № 6 и 7). Общий вид этих вариантов приведен на фиг. 109, 110 и 111.

Поверхностные линии токов и распределение поверхностных скоростей потока в зоне сопряжения и в подводящем канале (при отсутствии оградительных сооружений) показали достаточно плавное ответвление потока ($Q = 175$ *м³/сек*), забираемого в деривационный канал.



Фиг. 109. Первое типовое решение подхода к шлюзам со стороны нижнего бьефа; ширина подводящего канала по дну 20 *м*

б) Наличие при входе в деривационный канал направляющих сквозных пал оказывает благоприятное влияние на движение воды, улучшая обтекаемость принятых форм входного ковша.

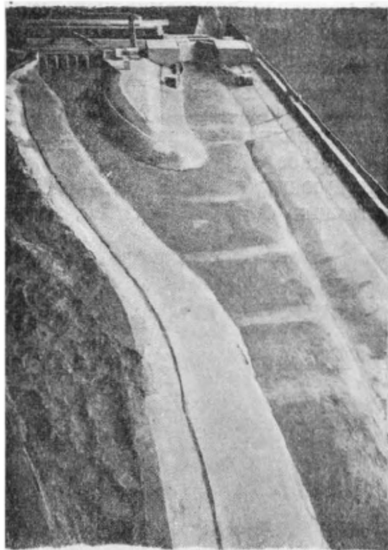
в) В целях безопасности проводки судов через ковш, образуемый при ответвлении подводящего канала, необходимым является по линии оградительных сооружений при входе в канал устройство козырька в виде вертикальной забральной стенки, погруженной на 3,0—3,5 *м* под минимальный судоходный горизонт. Этот козырек, пересекая поверхностные слои потока, направляет их вдоль оградительных сооружений и значительно уменьшает подсасывание судов в сторону подводящего канала.

г) В качестве вспомогательных мероприятий по улучшению проводки судов через ковш как при движении их через шлюз, так и при подходе к шлюзу лабораторией было рекомендовано: 1) укорачивание буксирного каната до возможных пределов, 2) применение подвижной причалки кормы судна с противоположного берега судоходного канала для удержания кормы на линии судового хода и предохранения ее от ударов о палы.

Все эти средства направлены на улучшение управляемости судов при под-

ходе к шлюзам и имеют особо важное значение при проводке судов водоизмещением 18 000 *т*.

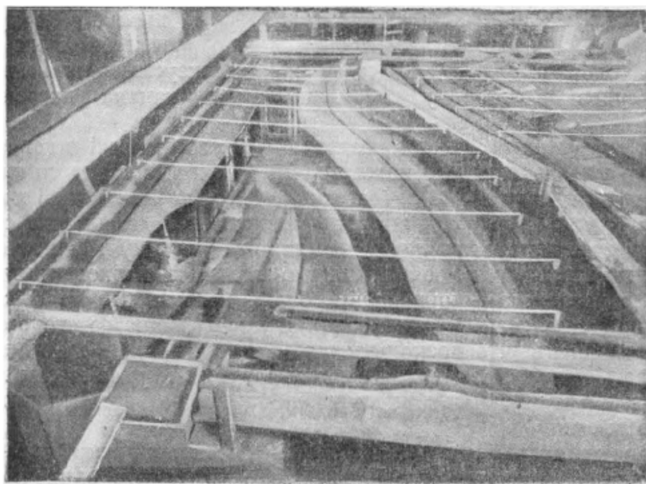
д) Оба окончательных варианта (№ 6 и 7), разработанных лабораторией, являются в гидравлическом и судоходном отношениях равноценными; основное их различие заключается в ширине подводящего деривационного канала по дну, которая может изменяться от 20 (вариант № 6) до 10 *м* (вариант № 7). Принятие того или иного варианта в каждом отдельном случае зависит от величины скоростей течения в зимнее время, которые по заданию не должны превосходить 0,8 *м/сек*.



Фиг. 110. Второе типовое решение подхода к шлюзам пятидесятиметровым узким по дну (10 *м*) подводящим каналом; вид со стороны основного канала

е) В целях закрепления форм сопряжения как подводящего, так и отводящего деривационных каналов, устраиваемых в легко размываемых грунтах, для которых допустимые скорости меньше 0,8 *м/сек*, предусмотрено крепление дна и откосов каналов при входе и на закруглениях.

Как общий вывод из проведенных лабораторией исследований необходимо отметить, что полученные типовые решения по сопряжению деривационных каналов насосных станций с основным каналом характеризуются минимальными размерами устройств, дающими максимальную экономию в земляных работах; в отношении судоходных условий эти решения являются предельно допустимыми и ни в коем случае не могут изменяться в сторону сокращения основных размеров.

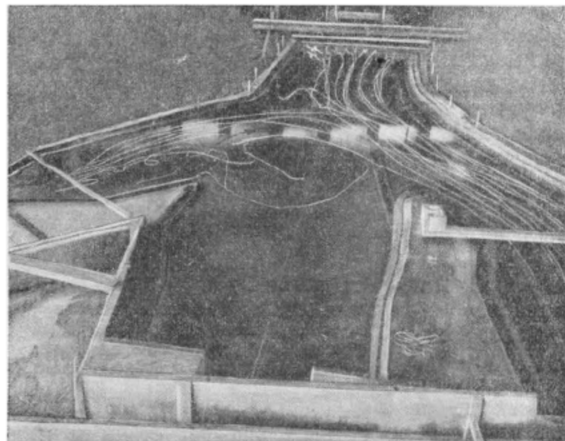


Фиг. 111. Второе типовое решение подхода к шлюзам; вид со стороны шлюза и насосной станции

б) Исследование подхода к шлюзу типа IIд

В отличие от типовых подходов к шлюзам при наличии насосных станций в низовом подходе к шлюзу типа IIд кроме забора воды на насосную станцию с помощью деривационного канала производится с противоположной стороны сброс воды ближайшей речки через шахтный водосброс (в опытах был устроен поверхностный водосброс обычного типа) и особый отводящий канал. Эти обстоятельства в связи с возможностью образования в пределах подхода поперечного течения еще более усложняли условие судоходства и потребовали постановки специальных исследований.

Лабораторные исследования производились на модели в масштабе 1 : 40 при следующем наиболее опасном случае эксплоатации: расход воды через насосную станцию $Q = 175{,}0$ *м³/сек*, из которых 116 *м³/сек* поступает из судоходного канала и 59,0 *м³/сек* — из речки (летний паводок повторяемостью один раз в в 20 лет); горизонты воды у подхода 137,70 *м*.



Фиг. 112. Общая гидравлическая картина на подходе к шлюзу типа II д. В середине — основной судоходный канал, справа — подводящий канал к насосной станции, слева — отводящий канал водосброса № 3

Исследования производились с помощью протаскивания моделей типовых судов (баржей водоизмещением 18 000 и 4 000 *т*) со скоростями 0,45 — 0,6 *м/сек* (н. в).

В результате лабораторных исследований были разрешены следующие основные вопросы:

1. Установлены наивыгоднейшее место и направление выпуска отводящего канала от водосброса в основной канал.

2. Подобраны такие очертания и формы сопряжения всех трех каналов, при которых создавались допустимые условия для судоходства, характеризуемые наименьшим подсасыванием судов в сторону деривационного канала насосной станции (фиг. 112).

3. Подобрано расположение оградительных сооружений в голове ковша деривационного канала в виде оградительных пал или эстакад со сплошной забральной стенкой на глубину 3 *м* (до отм. 134,70), пересекающей поверхностные слои потока. Такая стенка значительно уменьшает подсасывание судов.

4. В качестве вспомогательных мероприятий по улучшению условий судоходства как при движении судов от шлюза, так и при подходе к шлюзу лаборатория рекомендовала: а) укорачивание буксирного каната до возможных пределов и б) применение подвижной зачалки кормы судна со стороны берега.

Следует отметить, что поскольку управляемость судов на модели не могла соответствовать натуре, все опыты с протаскиванием судов имели лишь качественный характер и служили для выявления лучшего варианта при проектировании этого узла.

5. Исходя из аварийных условий сброса в канал речки, дно и откосы отводящего канала лаборатория рекомендовала укреплять одиночной мостовой. Кроме того в целях сохранения запроектированных на основании опытов форм и очертаний сопряжений отводящего и деривационного каналов с основным и обеспечения достигнутых гидравлических и судоходных условий лаборатория

считала необходимым укрепить дно и все криволинейные формы сопряжений в пределах ковша у подхода к шлюзу.

6. Полученные решения, являясь в судоходном отношении безопасными, в то же время удовлетворяли требованию максимальной экономии в земляных работах.

В связи с последующим уменьшением расчетного расхода насосных станций до 125 *м³/сек* можно рассчитывать, что некоторое подсасывание и удары судов об оградительные палы (при входе в деривационный канал), наблюдавшиеся во время опытов, в действительности будут еще меньше, причем условия подхода судов к шлюзу типа IIд будут не хуже, чем на остальных типовых подходах к шлюзам с насосными станциями.

в) Лабораторные исследования формы сопрягающего участка у выхода из насосных станций

Цель этих испытаний заключалась в подборе опытным путем рациональной формы и размеров сопрягающего участка между выходным сечением диффузоров насосных станций и нормальным сечением отводящего деривационного канала. Эта задача также является типовой для всех насосных станций. Рациональной формой указанного участка следует считать такую, которая обеспечивала бы плавное протекание потока без образования водоворотов, вызывающих излишние потери скоростного напора.

Работа выполнялась в условиях пространственной задачи в масштабе 1 : 30 при одновременной работе 7 агрегатов ($Q = 175{,}0$ *м³/сек*) и предельных положениях горизонтов в отводящем канале применительно к насосной станции у шлюза типа IIб.

Всего были исследованы три формы боковых стенок сопрягающего участка, а именно: 1) косые плоскости, 2) вертикальные стенки, в верхней части переходящие в откос, 3) ныряющие стенки (стенки, постепенно уменьшающиеся по высоте).

При всех вариантах длина сопрягающего участка составляла 70,0 *м*.

Наилучшие результаты как в отношении обтекаемости боковых стенок, так и плавности распределения скоростей потока на всей длине сопрягающего участка были получены при испытании первого и второго вариантов.

На основании этих испытаний, руководствуясь экономическими и конструктивными соображениями, был разработан окончательный проект сопрягающего участка применительно к варианту с вертикальными стенками и отсыпкой откоса.

Величины средних скоростей в конце сопрягающего участка составляли 0,55 — 0,60 *м/сек*. При принятых размерах диффузоров в начале сопрягающего участка средние скорости течения составляли около 0,85 — 0,90 *м/сек*.

При сокращении числа агрегатов до 5 и уменьшении расхода, подаваемого насосными станциями, до 125 *м³/сек* подобранные лабораторией размеры сопрягающего участка были сокращены с помощью теоретических расчетов, основанных на законах подобия, причем длина этого участка была уменьшена до 50 *м*.

ГЛАВА VIII

НЕКОТОРЫЕ СПЕЦИАЛЬНЫЕ ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Помимо общих и детальных исследований отдельных сооружений и узлов сооружений канала гидротехнической лабораторией Строительства был проведен ряд специальных исследований. К числу их относятся следующие исследования: вибрации сегментных затворов; сифонов и диффузоров насосных станций; водопроводных галлерей шлюзов; эффективности погашения энергии волн пловучими оградительными сооружениями; заградительных ворот канала; потока, насыщенного транспортируемым материалом в открытых лотках (движение гидромассы); гидроэлеваторов (для гидромеханизации) и ряд других. Остановимся кратко на рассмотрении лишь некоторых из них.

I. ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРАЦИИ СЕГМЕНТНЫХ ЗАТВОРОВ

При проектировании сегментных затворов одной из основных расчетных величин является подъемное усилие, а следовательно и величины напряжений в цепях Галля, на которых подвешен затвор. Это подъемное усилие обусловлено не только статическим моментом веса затвора, не только кинематикой и следовательно динамикой открывания затвора, но и силами непосредственного воздействия потока на затвор.

Так как затвор подвешен на цепях, хотя и очень жестких, но все же упругих, и так как в потоке, вырывающемся из-под затвора с большими скоростями, как скорости, так и давления непрерывно пульсируют, затвор неизбежно должен все время вибрировать с большими или меньшими амплитудами относительно положения равновесия.

Возникающие вследствие этого добавочные напряжения могут достигать больших величин (например в случае резонанса); поэтому знание хотя бы порядка этих величин необходимо. С этой целью гидротехнической лабораторией Строительства канала было произведено специальное экспериментальное и теоретическое исследование вибрации сегментных затворов[1].

Модель затвора была выполнена из железа и дерева в масштабе 1 : 15; цилиндрическая поверхность радиусом 80 *см* была обшита листовым железом. Ось вращения затвора для возможного уменьшения трения была посажена на шарикоподшипники, зазоры между стенками зеркального лотка и затвором составляли по 2 *мм* с каждой стороны, ширина лотка — 50 *см*. Общий вид модели приведен на фиг. 113.

В модельных условиях вертикальные составляющие нагрузки определялись следующим образом. Модель сегментного затвора была подвешена к весам Роберваля, установленным на плоском лотке (фиг. 113), причем установка сегментного затвора на требуемое (задаваемое) открытие производилась путем удлинения или укорочения проволоки, на которой модель затвора была подвешена к весам.

После установки затвора на требуемое открытие $H = \text{const}$ опытным путем определялась вертикальная составляющая собственного веса модели затвора, передающаяся на эту подвеску; для этого другая чашка весов нагружалась гирями до тех пор, пока весы не уравновешивались. Вес гирь давал вертикальную составляющую собственного веса затвора.

Затем весы останавливались, в лоток пускался необходимый расход воды и устанавливался определенный горизонт в верхнем и нижнем бьефах, после чего (по установлении режима потока) весы освобождались и подбором соответствующего числа гирь определялась вертикальная составляющая действия веса затвора и динамического действия потока на затвор. Вертикальная составляющая действия потока на затвор определялась как разность между вертикальной составляющей совместного действия потока с весом затвора и вертикальной составляющей собственного веса затвора.

Таким образом, производя опыты при различных открытиях затвора, получили ряд точек, которые дали кривую зависимости между величиной открытия и вертикальной составляющей сил действия потока на затвор. Форма этой кривой зависит как от гидравлических условий, так и от формы затвора. В значительной степени форма этой кривой, как показали исследования, определяет и период колебания затвора. На фиг. 114 приведены графики вертикальных составляющих, полученных теоретическим и экспериментальным путем, для одного случая устройства козырька в нижней части затвора.

Не приводя здесь результатов большого и достаточно сложного теоретического исследования (что составит предмет специальной работы), остановимся лишь вкратце на выводах, полученных в результате всей проделанной работы:

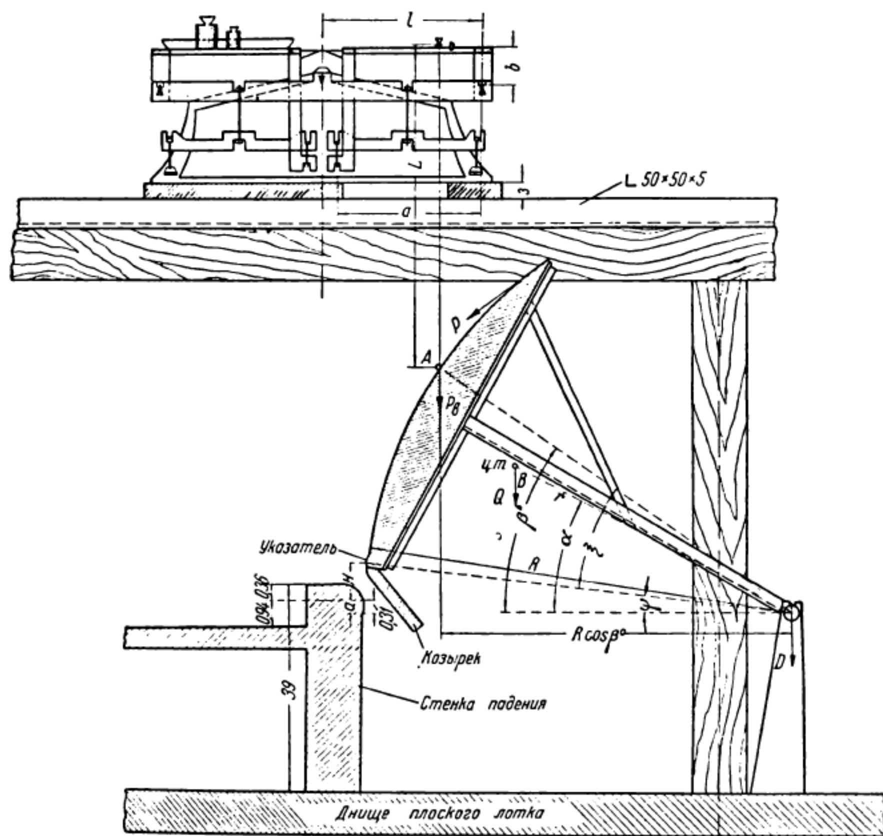
1. Сегментный затвор, подвешенный на цепях Галля, под действием пульсирующих сил протекающего под ним потока совершает колебательные движения. Колебания затвора вызывают в цепях дополнительные к статическим (переменные)

[1] Работа проводилась инж. Ю. Д. Городковым.

динамические напряжения, которые в некоторых случаях достигают значительных величин, а в случае резонанса (наблюдавшегося при опытах) могут превзойти временное сопротивление разрыву и привести к катастрофе.

При расчете величин динамических напряжений для суждения о возможности возникновения резонанса необходимо знать амплитуды и частоты пульсирующих сил потока, а также частоту собственных колебаний затвора.

2. Частота собственных колебаний затвора п р и   о т с у т с т в и и потока может быть вычислена из известных величин, определяющих жесткость цепей Галля и момент инерции затвора.



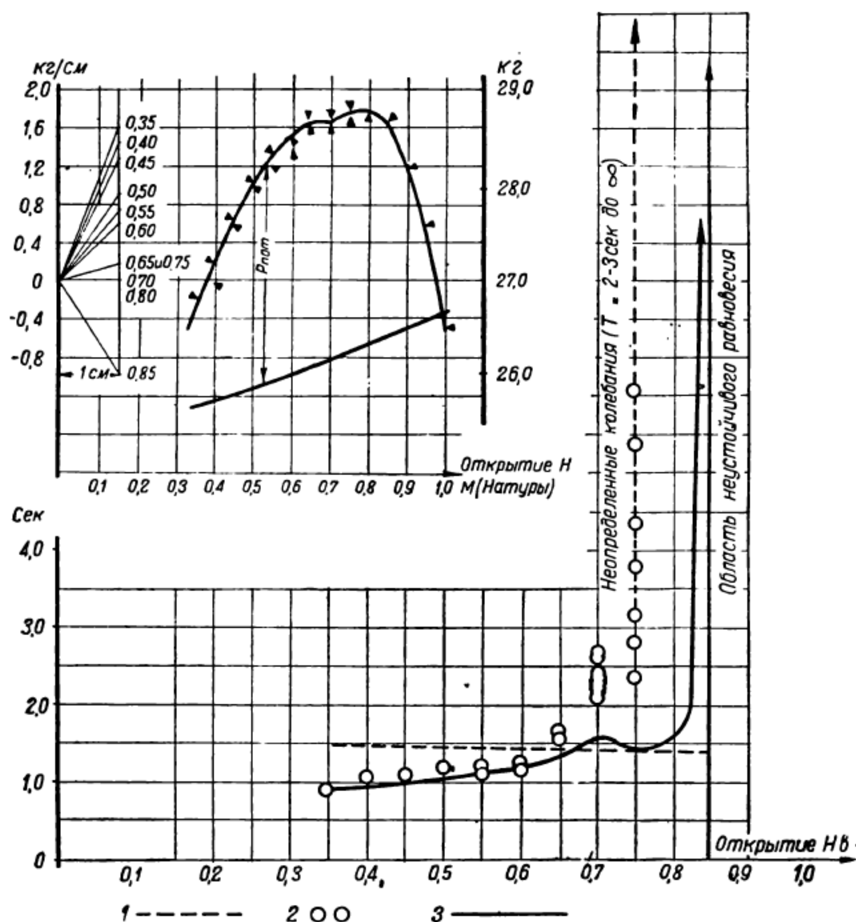
Фиг. 113. Схема установки модели сегментного затвора при исследовании его на вибрацию. Модель устанавливалась в плоском лотке.

Частота собственных колебаний затвора п р и   н а л и ч и и   п о т о к а, вытекающего из-под затвора, отличается от частоты собственных колебаний затвора при отсутствии потока. Это различие кроется в следующем. Опыты показали, что при постоянном горизонте верхнего бьефа обусловленная действием потока и осредненная во времени (т. е. без учета пульсации) нагрузка P на цепи для различных открытий H затвора различна, т. е. $P = f(H)$, а так как в процессе колебаний затвор перекрывает последовательно отверстия с различными H, то нагрузка на колеблющийся затвор является переменной; переменность нагрузки и является фактором, изменяющим частоту собственных колебаний затвора.

3. При разработке теории, дающей возможность определять периоды собственных колебаний затвора при наличии потока, принято следующее допущение:

предполагается, что поток в своем действии при колебаниях затвора «кинематически» следует за затвором, т. е. весь процесс можно рассматривать как непрерывный переход от одного установившегося режима к другому также установившемуся режиму.

Допущение «кинематичности» следования потока за затвором приводит (на основании рассмотрения диференциального уравнения колебаний) к выводу, что действие потока на затвор эквивалентно действию пружины, жесткость ко-



Фиг. 114. Графики вертикальных составляющих натяжения цепи, подвешивающей затвор, полученные теоретическим и экспериментальным путем: 1 — период собственных колебаний при отсутствии потока (эмпирические кривые); 2 — то же при наличии потока (экспериментальная точка); 3 — то же (теоретическая кривая)

торой может быть как положительной, так и отрицательной в зависимости от величины открытия H. Таким образом наличие потока равносильно включению в систему: затвор — упругая цепь некоторой дополнительной упругости, которую можно назвать «жесткостью потока». Включение «жесткости потока» и влечет изменение частот собственных колебаний затвора.

При этом допущении представляется возможным теоретически вычислить частоты собственных колебаний затвора при наличии потока, если известна кривая зависимости сил действия потока от величины открытия, т. е. если дана

кривая $P = f(H)$. Обратно, зная частоты собственных колебаний затвора при отсутствии потока и при наличии его, можно построить кривую $P = f(H)$ как огибающую касательные, направления которых вычисляются теоретически.

Опыты показали совпадение теоретически вычисленных частот собственных колебаний при наличии потока с экспериментальными частотами, следовательно доказали правильность теоретической трактовки рассматриваемого вопроса.

В заключение следует отметить, что в настоящем исследовании был рассмотрен только вопрос о влиянии потока на частоту собственных колебаний затвора и теоретически найденные величины частот сопоставлялись лишь с опытными данными. Для расчета же величин динамических напряжений в цепях необходимо изучить дополнительно вопрос о частотах и амплитудах пульсирующих сил потока, что является предметом специальных теоретических и экспериментальных исследований.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ГАШЕНИЯ ЭНЕРГИИ ВОЛН ПЛОВУЧИМИ ОГРАДИТЕЛЬНЫМИ СООРУЖЕНИЯМИ

Целью настоящего исследования[1] являлось нахождение зависимости между размерами пловучих оградительных сооружений (понтонов) и размерами волн на защищенной этими сооружениями от волнений акватории. Эта зависимость, выраженная графически или аналитически, дала бы возможность, во-первых, найти наиболее выгодные сочетания геометрических размеров понтонов для получения лучшего эффекта вообще и, во-вторых, ответить на практический вопрос, какими должны быть эти оградительные сооружения для того, чтобы высоты остаточной (погашенной) волны составляли примерно 25 — 30% от первоначальной (0,70 — 0,8 *м* — применительно к Рыбинскому гидроузлу).

Лабораторным исследованиям подвергались только так называемые ветровые волны (колебательные и цилиндрические) при следующих исходных данных (для натуры):

1. Глубина воды в водохранилище . . . . 10,0 *м*
2. Максимальная длина волны . . . . 25,0—20,0 »
3. Высота волны . . . . 2,5—2,0 »

Лабораторные исследования были проведены четырьмя циклами:

1) опыты предварительные;

2) опыты над понтонами различных размеров прямоугольного поперечного сечения;

3) опыты над треугольными (с подводными фермами) парными понтонами при различных схемах закрепления;

4) поверка на одном из понтонов моделируемости явления гашения энергии волн пловучими оградительными сооружениями.

Все исследования производились на специальной установке в виде лотка-бассейна длиной 16,0 *м*, шириной 2,0 *м* и высотой 0,85 *м*. В головной части лотка был установлен волнопродуктор, осуществленный по типу волнопродукторов, проверенных в лабораториях ЛИИВТ и ЦНИИВТ.

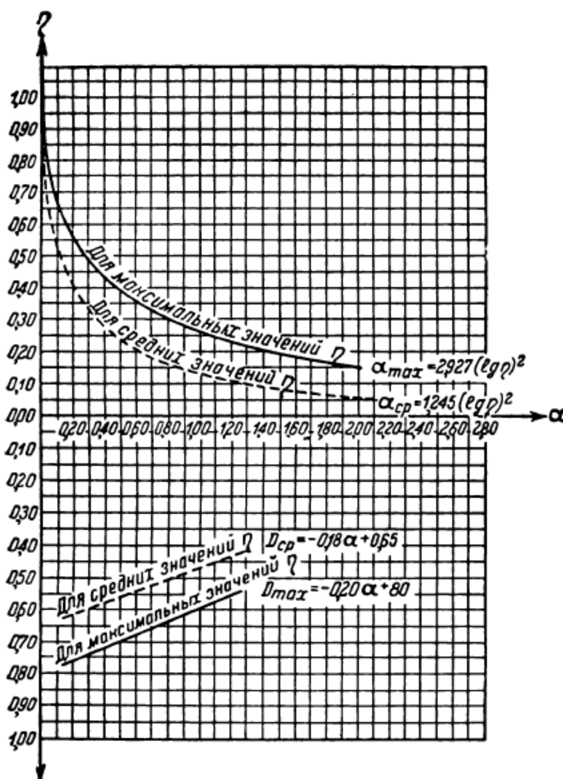
В низовой части лотка с целью устранения интерференции дно на участке 2,5 *м* сопрягалось с плоскостью, имевшей уклон 1 : 3.

Все опыты проводились в двух масштабах: первый с высотой полуволны $h = 0{,}03$ *м* для основных опытов и второй $h = 0{,}05$ *м* для поверочных опытов. Для установления фактического масштаба была проведена многократная фотосъемка волн.

При опытах производились наблюдения за высотой и длиной волны, усилиями в тросах, удерживающих понтоны в определенном положении, временем действия волн и глубиной воды в лотке.

На основании проведенных (достаточно подробных) опытов представляется возможным сделать следующие выводы:

[1] Работа проведена под руководством инж. В. Ф. Тейтельман по заданию Волгостроя.



Фиг. 115. Результаты опытов по исследованию условий гашения волн пловучими оградительными сооружениями для понтонов прямоугольной формы:

I — кривые зависимости $\alpha = f(\tau_i)$ по уравнениям типа $\alpha = a(\lg \tau_i)^2$ для наивыгоднейших значений $\beta_n = 1,77$, $\beta_н = 0,58$, $\gamma = 0,33$ $\left(\approx \frac{1}{3}\right)$; *II* — зависимость напряжения в тросах в *т/пог. м* понтона (для натуры). $D = f(d)$ по уравнениям типа $D = a\alpha + b$. Значения для D_{cp} и D_{max} получены обработкой осредненных данных опытов при разных высотах понтонов и сохранении постоянной $h_н$, т. е. для $\beta_н \approx 0,8$.

Примечания. 1. Значения принятых символов:

$$\alpha = \frac{L_n}{L_w};\ \tau_i = \frac{H'_w}{H_w};\quad \beta_н = \frac{h_н}{H_w};\quad \beta_n = \frac{H_n}{H_w};\quad \gamma = \frac{\beta_н}{\beta_n},$$

где h_n — длина понтона; H_n — высота понтона; $h_н$ — высота надводной части понтона; L_w — длина волны; H_w — высота волны; H'_w — высота волны на акватории

2. Для одного из волжских водохранилищ, где задано: $L_w = 25,0$ *м* и $H_w = 2,5$ *м*, наивыгоднейшие условия выражаются:

$$H_n = \beta_n H_w = 4,42\ м;\ h_н = \beta_н H_w = 1,44\ м.$$

$L_n = \alpha L_w$ (может быть определена по предложенным уравнениям сообразно с экономическими данными).

3. Обработка опытных данных проведена методом наименьших квадратов.

1. Проведенные опыты полностью подтверждают возможность защиты портовых акваторий от волнения пловучими оградительными сооружениями, установленными на якорях. При этом указанные сооружения должны быть закреплены якорными цепями в двух взаимно противоположных направлениях так, чтобы у них сохранилась возможность некоторого свободного колебания на поверхности воды; с этой же целью отдельные секции оградительной линии должны быть соединены между собой шарнирно.

2. В отличие от случаев, когда оградительные линии возводятся в виде сплошных стен, почти совершенно прекращающих волнение, для данного случая в незащищенном акватории волнение не устраняется полностью. Получающиеся остаточные волны носят характер толчеи и размеры их зависят исключительно от геометрических размеров пловучих оградительных сооружений и погашаемых волн.

3. Наилучшие результаты с точки зрения погашения волн показали прямоугольные понтоны (фиг. 115).

4. Обработка опытных данных с целью установления зависимости между геометрическими размерами понтонов и размерами остаточных волн или натяжением в тросах приводит для прямоугольных понтонов к следующим результатам.

Лучшие результаты дают понтоны, у которых полная высота $H_n = 1,77\ H_w$ и высота надводной части $h_н = 0,58\,H_w$; при этом для определения длины понтона возможно пользоваться уравнением:

$$L_n = 1,245\,L_w\left(\lg\frac{H'_w}{H^w}\right)^2$$

или

$$\alpha = 1{,}245\,(\lg \eta)^2.$$

Для выяснения получаемого эффекта при установке понтонов заданных размеров имеем:

$$\eta = e^{-2{,}064\sqrt{\alpha}} \text{ или } H'_w = H_w\, e^{-2{,}064\sqrt{\alpha}}.$$

Для определения натяжения в тросах на 1 *пог. м* получаем выражение:

$$D = 0{,}0119\, H_w\, L_w^{0{,}961}\, L_n^{0{,}039}.$$

В этих уравнениях:
H_n — высота понтона;
H_w — » волны до погашения;
$h_н$ — » подводной части;
H'_w — » волны после погашения;
L_n — длина понтона;
L_w — » волны до погашения;
D — натяжение в тросах;

$$\alpha = \frac{L_n}{L_w}; \quad \eta = \frac{H'_w}{H_w}.$$

Прямоугольные понтоны, поставленные в несколько рядов, не следует рекомендовать, так как с уменьшением размеров понтонов натяжения в тросах увеличиваются, а дополнительного эффекта в них не получается.

Все исследованные понтоны обоюдостороннего действия, поэтому они могут быть использованы также для защиты судового хода от волнения путем устройств одной оградительной линии с тем, что судоходство будет совершаться с подветренной стороны.

В заключение необходимо отметить, что вопрос гашения волн пловучими сооружениями, представляющий особенно большой интерес для волн глубоких водоемов, в настоящее время требует еще постановки специальных модельных и натурных исследований по специально разработанной программе.

ГЛАВА XI

ОРГАНИЗАЦИЯ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ПОВЕДЕНИЕМ СООРУЖЕНИЙ[1]

1. ОРГАНИЗАЦИЯ НАБЛЮДЕНИЙ

Практика строительства и эксплоатации крупных и ответственных гидротехнических сооружений давно установила необходимость организации постоянных наблюдений за состоянием и работой гидротехнических сооружений еще в процессе постройки с тем, чтобы эти наблюдения были продолжены в течение пускового и эксплоатационного периодов. Поэтому на строительстве канала Москва—Волга, представлявшем собой крайне сложный комплекс ответственных гидротехнических сооружений, были впервые в нашей практике организованы весьма обширные работы по изучению поведения сооружений.

Основное назначение этих работ заключалось в систематическом наблюдении за состоянием сооружений и изучении работы отдельных их элементов.

Первая из поставленных задач имела преимущественно практическое значение, так как регулярные наблюдения были необходимы для своевременного устранения всех замеченных строительных дефектов до сдачи сооружения в экс-

[1] Принятая на строительстве канала методология этих наблюдений изложена более подробно в труде доктора технических наук проф. А. А. Угинчус, работавшего в должности начальника отдела исследований Москваволгостроя в период строительства канала (А. А. Угинчус, Исследования гидротехнических сооружений, Госэнергоиздат, 1939).

плоатацию, а также для обеспечения надежной работы и хорошего состояния сооружений в будущем.

Вторая задача помимо своего большого практического значения для объяснения происходящих явлений служила также для накопления исследовательского материала, необходимого в дальнейшем для проверки и корректирования теоретических формул и коэфициентов, для проверки условий моделирования сложных явлений и т. д., т. е. носила научно-исследовательский характер. Полученный при этом исследовательский материал дал кроме того возможность выработать рациональные и технически обоснованные правила эксплоатации сооружений канала и позволил создать обширную базу для использования опыта строительства канала Москва—Волга.

Созданный для проведения этих работ специальный Отдел исследований Москваволгостроя разработал методику и инструкции по наблюдению и изучению сооружений, а также проекты измерительной аппаратуры и установки ее на сооружениях. Кроме того Отдел исследований принимал участие в разработке мероприятий по устранению обнаруженных в результате наблюдения дефектов в работе сооружений.

Значительное развитие на канале Москва—Волга получили также исследовательские работы по изучению влияния водохранилищ и канала на режим грунтовых вод в прилегающих к ним районах. Эти данные требовались для проектирования необходимых мелиоративных мероприятий, устраняющих возможность подтопления грунтовыми водами сельскохозяйственных угодий в результате создания водохранилищ.

Обращаясь к организационной структуре Отдела исследований Москваволгостроя, следует отметить, что для систематического наблюдения за поведением сооружений была организована сеть из пяти исследовательских станций со штатом в 3 — 4 инженерно-технических работника каждая, не считая штатного персонала наблюдателей. Исследовательские станции работали под непосредственным руководством отдела.

В район наблюдений каждой станции входили определенный участок канала и все находящиеся на этом участке сооружения (плотины, шлюзы, насосные станции и прочие сооружения).

Работы Отдела исследований сооружений получили наиболее широкое развитие к моменту окончания строительства, когда по ходу дела выявилось, что этот отдел в дальнейшем должен стать составной частью будущего Управления эксплоатации канала для продолжения начатых наблюдений за сооружениями и обработки огромного исследовательского материала, собранного в строительный и пусковой периоды канала. Кроме того для составления окончательных выводов по ряду вопросов необходимо было пополнить исследовательский материал результатами наблюдений, которые могли быть получены лишь после длительного периода работы сооружений в эксплоатационных условиях, поскольку некоторые процессы (осадки, деформации бетона, фильтрация в плотинах и т. п.) находились еще в стадии развития и требовали для наблюдений более продолжительного времени.

Одним из наиболее интересных и ответственных периодов в работе Отдела исследований явился пусковой период эксплоатации сооружений. На этот период весь аппарат отдела, усиленный дополнительным инженерно-техническим составом, был по существу переведен на диспетчерскую службу с круглосуточным дежурством по наблюдению за поведением вступающих в эксплоатацию сооружений. Ежедневно составлялись подробные диспетчерские сводки о поведении каждого сооружения с результатами наблюдений по контрольно-измерительным приборам, регистрирующим осадки, фильтрацию и другие явления.

Итоги этих наблюдений представляют собой интереснейший материал, отражающий в мельчайших деталях всю начальную жизнь сооружений канала.

В последующий период эксплоатации, т. е. после двух-трехмесячной работы канала, ежедневные сводки были заменены пятидневными, а затем декадными.

За время своего существования отдел исследований Москваволгостроя выполнил значительное количество самых разнообразных исследовательских работ, среди которых наибольший практический и научный интерес представляют следующие работы[1]:

1) изучение осадок бетонных и земляных сооружений;

2) изучение движения фильтрационного потока в теле восьми крупнейших в СССР земляных плотин, характеризующихся различными типами противофильтрационных конструкций (экраны, центральные ядра, понуры), а также изучение работы обратных фильтров различных типов;

3) наблюдения за местными деформациями бетонных сооружений с фиксацией температурно-усадочных трещин;

4) изучение противодавления фильтрационного потока в основании бетонных сооружений (шлюзы, плотины, водосбросы);

5) изучение движения фильтрационного потока в обход наиболее ответственных бетонных и земляных сооружений;

6) изучение гидравлики типовых шлюзов, а также колебаний бьефов при подходе к шлюзам;

7) изучение гашения энергии на различных сооружениях (донные водоспуски, бетонные плотины).

Кроме того были проведены исследования по отдельным заданиям для разрешения специальных вопросов, например вибрации затворов, наблюдения за работой шлюзных ворот и др.

Для ведения указанных комплексных исследований на сооружениях применялись различные контрольно-измерительные приборы (высотные марки, пьезометры, динамометры и телетензометры, щелемеры, сдвигомеры и т. д.), обеспечивающие длительное изучение поведения сооружений.

Следует заметить, что большое число измерительных приборов и устройств были запроектированы и изготовлены силами Строительства. Так например, были разработаны специальные конструкции пьезометров для земляных и бетонных сооружений, лимниграфы, электроконтактные приборы для точного определения уровня воды в пьезометрах, специальные конструкции щелемеров для ведения наблюдений за поведением трещин и температурных швов, а также ряда других приспособлений. Контрольно-измерительные приборы в большинстве случаев изготовлялись в собственных мастерских Строительства.

Кроме этого на Строительстве были использованы изготовленные в б. Ленинградском институте сооружений электроакустические струнные динамометры и телетензометры системы проф. Н. Н. Давиденкова. В дальнейшем изготовление и этих приборов было освоено в специально созданной на Строительстве лаборатории физических методов измерений.

2. СОСТАВ НАБЛЮДЕНИЙ

Выполненные Отделом исследований Москваволгостроя наблюдения на сооружениях канала можно разделить на три основные группы:

1. Изучение деформаций гидротехнических сооружений. К этой группе относятся:

а) Наблюдения за осадками и сдвигами бетонных сооружений и перекосами этих сооружений; наблюдения за осадками земляных плотин и дамб и деформациями их поперечного профиля; наблюдения за деформациями земляных масс в пределах низового откоса земляных сооружений и наблюдение за выпиранием грунта из-под плотины.

б) Изучение давления грунта на основания сооружений и давления грунта на стенки сооружений.

в) Изучение местных деформаций бетонных сооружений и фиксация поверхностных температурно-усадочных трещин; изучение напряжений в бетоне и арма-

[1] Результаты этих исследований по основным сооружениям приведены в соответствующих специальных томах технического отчета — «Гидротехнические сооружения», «Путевые сооружения» и др.

туре (в типовых конструкциях шлюза) при помощи электроакустических струнных приборов.

2. Изучение фильтрации в гидротехнических сооружениях. К данной группе исследований относятся следующие:

а) Наблюдения за фильтрацией в земляных плотинах и дамбах, т. е. наблюдения за положением кривой депрессии, величиной фильтрационного расхода, деятельностью очагов фильтрации, фильтрацией в обход плотины, работой обратных фильтров и дренажа, фильтрацией вдоль подземных контуров бетонных водоспусков и т. д.

б) Наблюдения за фильтрацией под бетонными сооружениями, т. е. изучение величины противодавления фильтрационного потока, наблюдения за деятельностью очагов фильтрации, за фильтрацией в обход бетонных и земляных частей сооружений, изучение работы разгрузочных устройств (фильтры, дренажи), наблюдения за фильтрацией через бетон.

в. Наблюдения за фильтрацией из каналов (величина фильтрационного расхода, влияние фильтрации из канала на естественный уровень грунтовых вод), а также исследования различных противофильтрационных мероприятий, т. е. изучение эффективности различных типов противофильтрационных покрытий и облицовок.

3. Изучение гидравлики сооружений. Сюда относятся:

а) Наблюдения за устойчивостью отдельных элементов нижнего бьефа сооружения при воздействии на них водного потока.

б) Изучение работы шлюзов, т. е. определение времени наполнения и опорожнения шлюзов, изучение работы гасителей энергии, определение коэфициентов расхода для обходных галлерей и сегментных затворов, исследование натяжений в тросах, закрепляющих судно, и пр.

в) Наблюдения за устойчивостью профиля канала: размывом русла и оплыванием откосов канала, состоянием креплений и действием судовой волны на откос и т. д.

г) Различные специальные гидравлические исследования сооружений: определение для отверстий коэфициентов: расхода, затопления, сжатия и скорости; исследование работы гасителей энергии в нижнем бьефе, исследования, необходимые для тарировки открытия затворов сооружений, и т. д.

3. МЕТОДИКА НАБЛЮДЕНИЙ И ОСНОВНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

1. Для изучения осадок сооружений в наиболее характерных их частях помещались высотные марки, по перемещению которых в высотном направлении фиксировались осадки сооружений.

Марки в сооружениях располагались следующим образом.

В шлюзах — по четыре марки на каждой голове и по четыре марки по углам на доковых секциях камеры шлюза. Марки устанавливались в углах массивов на расстоянии не менее 0,50 *м* от краев; таким же образом марки располагались на бычках и устоях бетонных плотин, водосбросов и на других сооружениях. Если ширина бычка составляла менее 2,0 *м*, ограничивались двумя точками, расположенными по оси. Расположение четырех марок в бетонных массивах имело своей целью определение как величины осадок, так и неравномерности осадки контура сооружений.

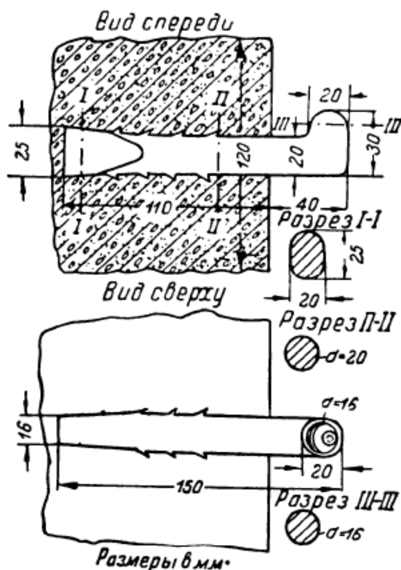
В донных водоспусках, устраиваемых в теле земляных плотин, высотные марки устанавливались по краям каждого звена в середине свода трубы.

Для наблюдения осадок мостовых устоев и бычков расположение высотных марок производилось аналогично вышеприведенным схемам, но с учетом специфических особенностей верхнего строения данной категории сооружений.

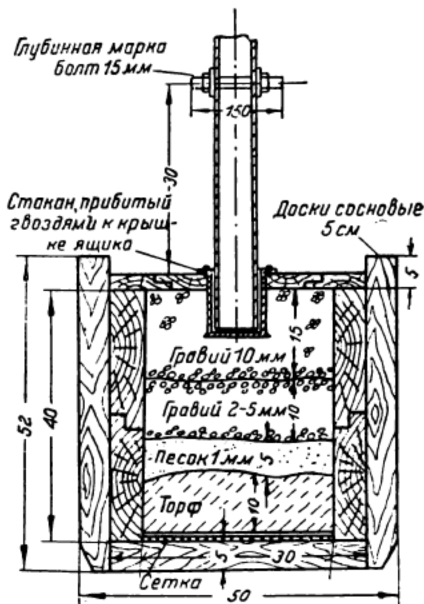
Исходный репер, от которого велись наблюдения над высотными марками, устанавливался в стороне от сооружения. Конструкция исходного репера была стандартного типа, применяемого в геодезической практике для постоянных реперов.

Высотные марки, закладываемые на поверхности бетонных сооружений, делались длиной 150 *мм* из отрезков круглого железа диаметром 20 *мм* (фиг. 116).

Помимо высотных наружных марок в основаниях некоторых шлюзов закладывались глубинные марки-реперы для наблюдения за осадками в процессе возведения сооружений с момента начала бетонирования. Глубинная марка-репер, обычно совмещаемая с пьезометрическими трубами, представляла собой железный болт $d = 15$ *мм*, пропускаемый через стенки нижнего звена трубы (фиг. 117). Концы болта выпускались через стенки трубы на 2 — 3 *см* наружу и при помощи прецизионной нивелировки связывались с основным репером, т. е. устанавливалась начальная отметка глубинной марки. По мере возведения сооружения труба наращивалась, и отметка глубинной марки переносилась выше (на урезы труб).



Фиг. 116. Высотная марка из круглого железа



Фиг. 117. Глубинная марка-репер, совмещенная с пьезометрической трубой

После заложения высотных марок производилась прецизионная нивелировка всей системы высотных марок и реперов от ближайшего постоянного репера.

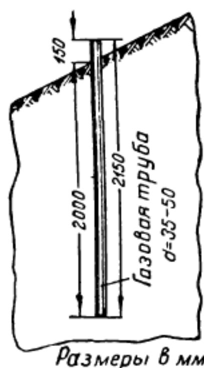
Наблюдения за осадками готовых сооружений производились периодически путем прецизионной нивелировки высотных марок; наблюдения же за осадками сооружений, находившихся в процессе их возведения, велись при помощи нивелировки, единственно доступной по условиям производства работ.

Для наблюдения за осадками земляных плотин служили высотные знаки, располагаемые на гребне по бровке сухого откоса на расстоянии 50 — 70 *м* друг от друга; для наблюдения же за осадками откосов служили высотные знаки — на характерных поперечных профилях плотины. Высотные знаки (реперы) устраивались из обрезков газовых труб (фиг. 118) или круглого железа (длиной 1,5 — 2,0 *м*) или деревянных свай $d = 18 — 20$ *см* с поперечиной, вкапываемых на глубину 1,50 — 1,75 *м* (фиг. 119).

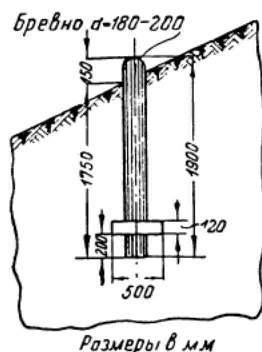
Определение осадок по высотным знакам производилось при помощи нивелировки их замкнутым ходом между двумя бетонными исходными реперами, располагаемыми на оси плотины на правом и левом берегах.

Для наблюдения за осадками оснований земляных плотин и дамб служили глубинные марки (реперы), представлявшие собой бетонную плиту размером

1,5 × 1,5 *м* или 2,0 × 2,0 *м*, толщиной 0,2 *м*, укладываемую на основании плотины и засыпаемую грунтом при возведении тела плотины (фиг. 120). Точка заложения глубинной марки закреплялась двумя створными плоскостями. Плита укладывалась по уровню, и отметка ее центра определялась двойным нивелированием от исходного репера. По окончании работ по постройке плотины на гребне ее определялась точка, соответствовавшая центру заложения плиты (по створам), и производилось бурение до верхней поверхности бетонной плиты. После этого



Фиг. 118. Высотный знак из газовой трубы

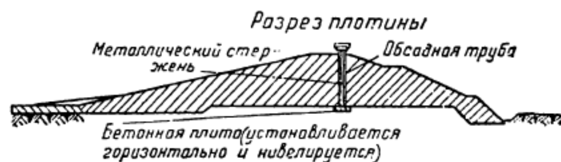


Фиг. 119. Деревянный высотный знак

обсадную трубу оставляли в скважине и вставляли в нее металлический стержень, при помощи которого и определялась отметка осевшей плиты (с точностью до 0,5 *мм*). Дальнейшие наблюдения велись периодически путем нивелировок верха стержня. Для определения величины дополнительного уплотнения тела плотины около скважины устанавливался высотный знак, нивелируемый одновременно со стержнем.

Помимо наблюдений за осадками сооружений наблюдения велись также за деформациями грунта у низового откоса, которые могли произойти вследствие осадки земляных масс тела плотины. Одновременно производились наблюдения



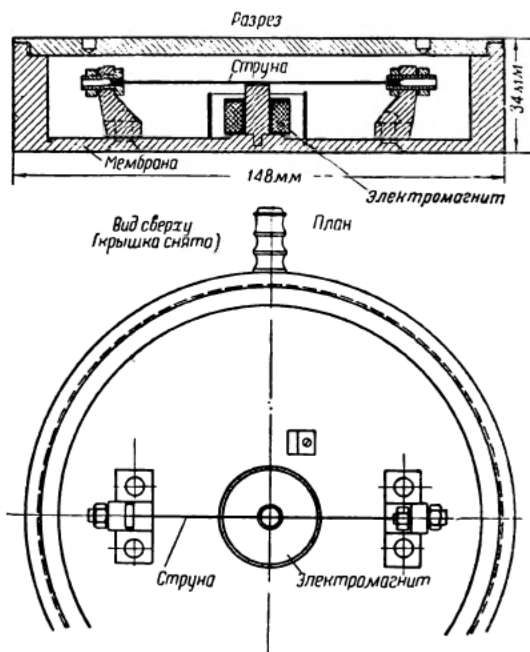


Фиг. 120. Глубинная марка для определения осадок оснований земляных плотин

и за изменением профиля откосов сооружения. С этой целью на сухих откосах плотины перпендикулярно ее продольной оси устанавливалась сеть реперов, захватывавшая часть прилегающей к плотине поймы; измерением смещения расположенных в створе реперов фиксировалась деформация откосов в плане, а по высотному их перемещению определялась осадка или выпучивание грунта.

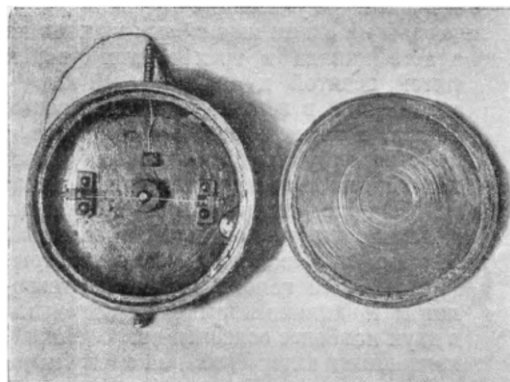
2. Для определения давлений, испытываемых грунтами оснований сооружений, а также для определения давлений на боковые стенки сооружений от обратных засыпок применялись электроакустические струнные динамометры системы проф. Н. Н. Давиденкова, несколько переконструированные инж. В. П. Бомбчинским, изготовлявшиеся б. Ленинградским институтом сооружений.

Динамометр указанной конструкции представляет собой стальную жесткую цилиндрическую коробку с мембраной, герметически закрываемую верхней крышкой (фиг. 121 и 122). На мембране при помощи двух консолей натягивается стальная струна, которая приводится в колебательное движение электромагнитом, помещенным в середине прибора. Прибор этот при помощи кабеля соединялся с центральной генераторной станцией (фиг. 123).



Фиг. 121. Электроакустический динамометр системы проф. Н. Н. Давиденкова

Затухающие колебания струны в поле электромагнита обусловливают возникновение в катушке его переменной электродвижущей силы с периодом, соответствующим колебанию струны. Эта электродвижущая сила на центральной станции воспринимается в телефоне как звук. Частота колебаний струны динамометра определяется путем сравнения ее с частотой стабилизированного генератора центральной станции. Перед установкой каждый динамометр градуировался, и составлялась тарировочная кривая связи между давлением на мембрану и частотой колебаний струны; пользуясь этой кривой, по частоте колебаний струны определяли давление на грунт под сооружением или на подпорную стенку в месте заложения динамометра.



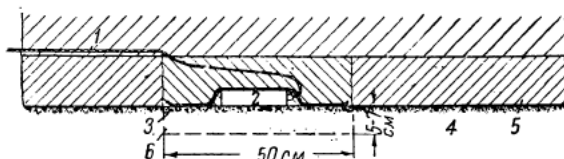
Фиг. 122. Общий вид электроакустического динамометра системы Н. Н. Давиденкова (крышка снята)

3. Наблюдения за местными деформациями в отдельных точках бетонной кладки и арматуры производились при помощи струнных телетензометров системы проф. Н. Н. Давиденкова, изготовленных также в б. Ленинградском институте сооружений. Для определения деформаций в бетоне применялись телетензометры, состоящие из двух стальных головок с крестовинами, соединенными между собой тонкостенной латунной трубкой, в которой между головками натянута стальная струна (фиг. 124 и 125). При помощи этой струны измерялось изменение расстояния между крестовинами прибора, заложенного в бетон, при деформации последнего.

Телетензометры, подобно тому, как и вышеописанные динамометры, соединялись проводом с генераторной станцией, с помощью которой определялась

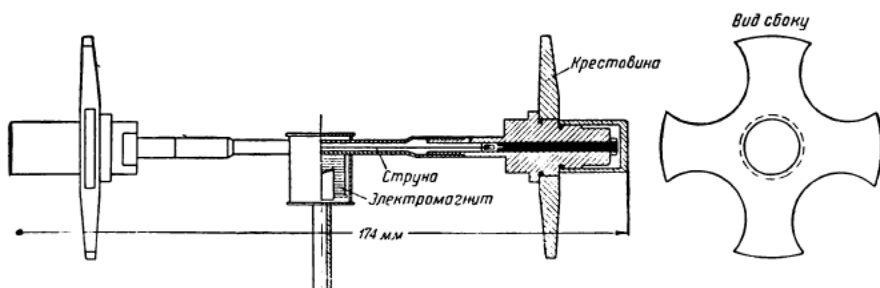
частота колебаний струны; зная эту частоту, по теоретической формуле вычисляли деформации бетона, а затем и напряжения в них.

Для измерения деформаций в арматуре применялись специальные арматурные телетензометры (фиг. 126). В этих приборах струна натягивалась между



Фиг. 123. Установка электроакустического динамометра в основании сооружения:

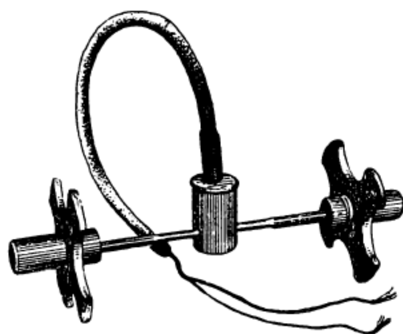
1 — кабель; 2 — динамометр; 3 — галька в 2 — 3 слоя для предохранения песка от проникания в него цементного раствора; 4 — грунт; 5 — основание сооружения (подготовка слоем 15 см); 6 — мелкий песок, заменивший грунт для равномерной передачи давления на грунт



Фиг. 124. Электроакустический телетензометр системы Н. Н. Давиденкова

двумя колками, прикрепляемыми к арматуре, и защищалась латунным кожухом. В остальном арматурные телетензометры аналогичны описанным выше струнным приборам.

Для изучения напряжений в бетоне и в арматуре указанные струнные электроакустические телетензометры были заложены на одном из типовых шлюзов на трассе канала в трех осевых створах пятой, девятой и одиннадцатой камерных секций в верхней и нижней зонах днища, а также в боковых стенках тех же створов у внутренних и наружных граней; для изучения давления засыпки на боковые стенки были применены динамометры, располагавшиеся в тех же боковых створах, что и телетензометры.



Фиг. 125. Общий вид телетензометра системы Н. Н. Давиденкова

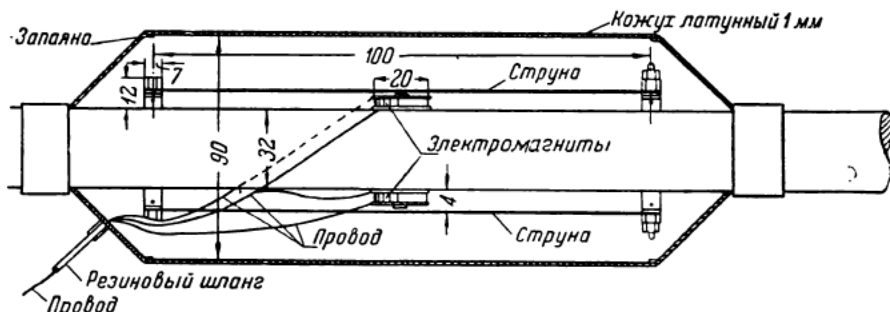
В нижней голове шлюза телетензометры и динамометры были заложены в двух наиболее ослабленных сечениях, являвшихся интересными с конструктивной точки зрения. В верхней голове динамометры были установлены лишь в одном створе. В каждом сечении приборы располагались симметрично, причем количество их в каждом створе было вполне достаточно для построения соответствующих эпюр. На фиг. 127, *б* и *в* показана схема размещения струнных приборов на типовом шлюзе, подвергавшемся исследованиям (фиг. 127, *а* и *б*). Интересно отметить, что для монтажа всех

приборов было израсходовано до 10 *км* двухжильного провода типа СРГ только на одном сооружении.

4. Для наблюдения за фильтрацией в теле земляных плотин и дамб основными устройствами являлись пьезометры (фиг. 128), представляющие собой металлические трубы, устанавливаемые в теле плотины.

Пьезометры располагались в теле плотины в наиболее ответственных и характерных профилях: в поперечниках с большим напором воды верхнего бьефа, в поперечниках, проходящих вдоль перекрываемого плотиной русла реки, по оси и сторонам донного водоспуска, а также в других характерных частях плотины, где необходимо было осуществить контроль за состоянием высоты горизонта фильтрационного потока или за работой понура, экрана и обратного фильтра.

Количество пьезометрических точек устанавливалось с таким расчетом, чтобы можно было получить на профилях кривую депрессии, т. е. обеспечить получение не менее трех точек до обратного фильтра в низовом откосе и одной точки за обратным фильтром. Глубина заложения пьезометров определялась, исходя из тех соображений, чтобы концы пьезометрических труб находились на уровне подошвы обратного фильтра. В местах сопряжения плотины с берегами и



Фиг. 126. Двухструнный телетензометр для измерения деформации в арматуре

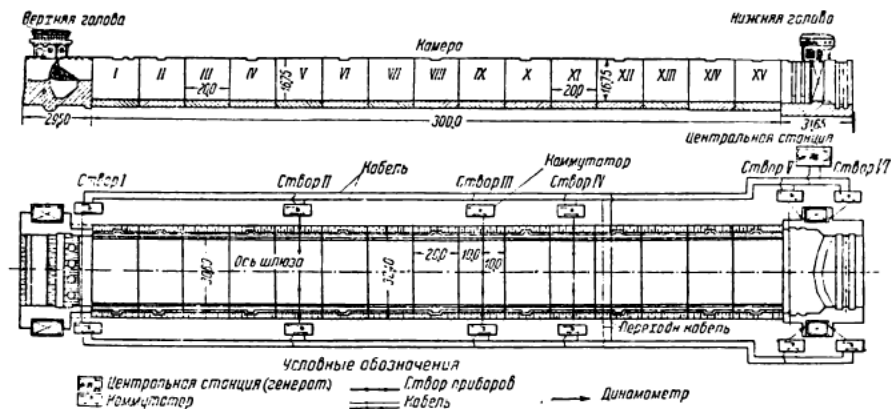
по чаше водохранилища глубина пьезометров, как правило, назначалась в зависимости от залегания коренных непроницаемых пород, так как пьезометр должен был прорезать всю толщу проницаемых грунтов.

В нижней части пьезометрической трубы высверливались отверстия до высоты ожидаемой депрессионной кривой, определяемой по теоретическим подсчетам, с запасом в 2,0 *м*.

В пределах перфорированной части труба покрывалась железной сеткой с отверстиями диаметром 2 — 3 *мм*, которая хорошо припаивалась к трубе во избежание сдвига ее во время опускания пьезометра (фиг. 128). На конец трубы надевался стакан, сделанный из железа. На сетку укладывался слой в 3 *см* слабо разложившегося волокнистого торфа или мха (для этой цели брался самый поверхностный слой торфа очес — без живого покрова и корней). Торф прижимался плотно к стенкам трубы, обертывался кустарным холстом или мешковиной и закреплялся через 10 *см* железной проволокой. Наружный конец пьезометра выводился над уровнем земли на высоту 0,8 *м* и заделывался в бетонный столб. На пьезометрическую трубу навинчивалась особая крышка, открывавшаяся специальным ключом (фиг. 129).

Наблюдения за уровнем воды в пьезометрах в период неустановившегося режима фильтрационного потока в теле плотины производились ежесуточно в процессе наполнения водохранилищ.

В состав наблюдений за фильтрационным потоком через земляные плотины входили также наблюдения за горизонтами воды в верхнем и нижнем бьефах плотины. Для измерения уровня воды в бьефах были построены надежные свайные водомерные посты общепринятого типа.



Фиг. 127 а. Схема размещения струнных приборов на типовом шлюзе

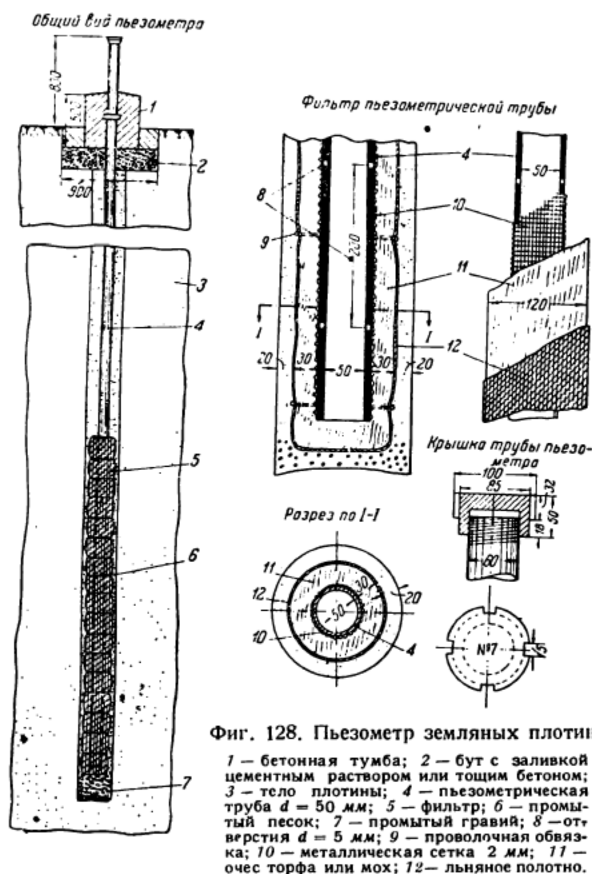
План

Условные обозначения — Динамометр; Телетензометр для бетона; — „ — — „ — арматуры

Фиг. 127 б. Схема размещения струнных приборов в поперечном сечении камеры шлюза

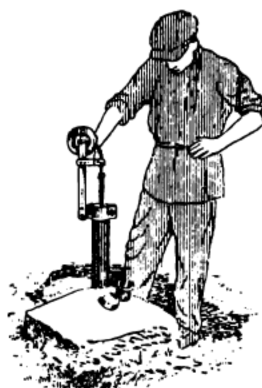
Измерение уровней воды в пьезометре производилось при помощи лот-свистка (фиг. 130), опускаемого в скважину на стальной ленте посредством специальной лебедки (фиг. 131).

Лот-свисток представляет собой полый цилиндр, который дает свисток при ударе нижней поверхности цилиндра о поверхность воды при опускании прибора в скважину. Звук получается вследствие быстрого вытеснения воздуха водой. С наружной стороны лот имеет тарелочные кольцевые желобки, расположенные друг от друга через 1 *см* и служащие для определения глубины, на которую прибор опущен в воду. В тех же случаях, где требовалась большая точность измерения уровней, вместо лот-свистков применялись электроконтактные приборы (фиг. 132 и 133).



Фиг. 128. Пьезометр земляных плотин:

1 — бетонная тумба; *2* — бут с заливкой цементным раствором или тощим бетоном; *3* — тело плотины; *4* — пьезометрическая труба $d = 50$ *мм*; *5* — фильтр; *6* — промытый песок; *7* — промытый гравий; *8* — отверстия $d = 5$ *мм*; *9* — проволочная обвязка; *10* — металлическая сетка 2 *мм*; *11* — очес торфа или мох; *12* — льняное полотно.



Фиг. 129. Общий вид пьезометрической скважины на земляных плотинах

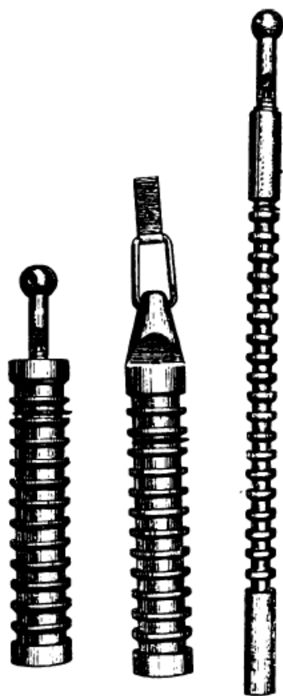
Электроконтактный прибор, изображенный на фиг. 132, представляет собой полый металлический цилиндр диаметром 3 *см* и длиной 25 *см*, разделенный на две части эбонитовой перегородкой *а*, через середину которой пропущен изолированный проводник *б*, соединяемый со стальной лентой. Между стальной лентой и пьезометрической трубой включены звонок и электробатарея, помещенные наверху в отдельном ящике. В нижней части полого цилиндра ходит литой медный цилиндр *с*, который при касании с проводником *б* дает контакт и в момент контакта (непосредственно после касания цилиндра с горизонтом воды в пьезометре) включается звонок.

Для вылавливания из пьезометров оборвавшихся лот-свистков применялись специальные «кошки» (фиг. 134).

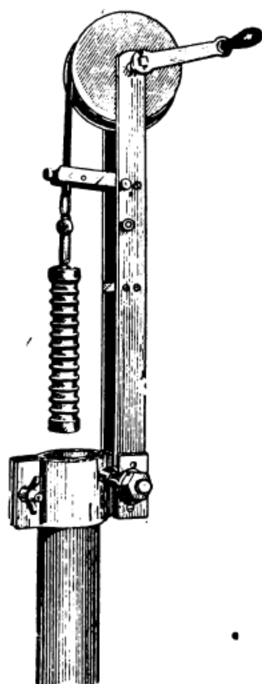
Попутно с наблюдениями за горизонтами воды в пьезометрических скважинах велись также наблюдения за температурой воды в пьезометрах и в верхнем и нижнем бьефах.

Наблюдения за скоростями фильтрации воды через тело земляных плотин выполнялись лишь по отдельным заданиям. Определение расхода воды, фильтрующей через тело земляной плотины, производилось путем замера расходов воды в отдельных коллекторах, заложенных в дренажной системе плотины. Небольшой расход фильтрующей воды замерялся объемным способом, а расходы большей величины — водосливами Томсона.

При обнаружении очагов фильтрации последние отмечались на плане с указанием даты их появления. Наблюдения за обнаруженными очагами фильтрации



Фиг. 130. Различные типы лот-свистка



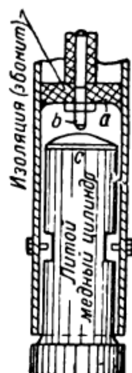
Фиг. 131. Лот-свисток с лебедкой, надетой на пьезометрическую трубу

сводились к фиксированию их деятельности и измерению расхода в различные периоды фильтрации (усиления или уменьшения ее). Исследования очагов фильтрации производились с целью определения причин их возникновения для возможности скорейшей их локализации и дальнейшей ликвидации.

5. Наблюдения за величиной фильтрационного напора (противодавления) на подошвы бетонных гидротехнических сооружений производились посредством измерения уровней воды в пьезометрах, закладываемых в теле бетонных сооружений. Пьезометры располагались таким образом, чтобы в результате наблюдений можно было определять направление фильтрационного потока и величину противодавления в наиболее ответственных частях сооружения. При размещении пьезометров, служащих для определения противодавлений в бетонных сооружениях, учитывалось, чтобы пьезометрами были охвачены наиболее характерные точки эпюры противодавления. При этом в первую очередь освещалась при помощи пьезометрических наблюдений эффективность работы шпунтов, зубьев и фильтров (разгружающих устройств). Поэтому число пьезометрических точек определялось

в зависимости от конструктивных особенностей подземного контура, причем число пьезометров нигде не было ниже трех в одном створе.

Пьезометры устраивались из газовых или водопроводных труб внутренним диаметром не менее 5 *см*, причем все соединения труб делались с применением фасонных стандартных частей (фиг. 135). Верхние концы пьезометров выводились на незатопляемые части сооружения (устои плотины, головы или стенки шлюзов) и закрывались крышками (фиг. 135 и 136). Для предотвращения пьезометра от засорения мелкими частицами грунта в нижней части пьезометра устраивался фильтр в виде ящика с двойными боковыми стенками (фиг. 137). В дне ящика имелись отверстия, закрытые проволочной сеткой с отверстиями 5 —



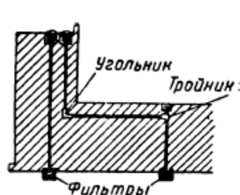
Фиг. 132. Электроконтактный прибор для измерения уровней воды в пьезометрах

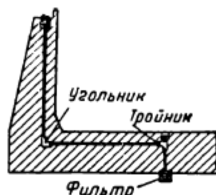


Фиг. 134. «Кошка» для улавливания оборвавшихся лотсвистков в трубе



Фиг. 133. Электроконтактный прибор для определения уровней воды в пьезометрах. Общий вид.



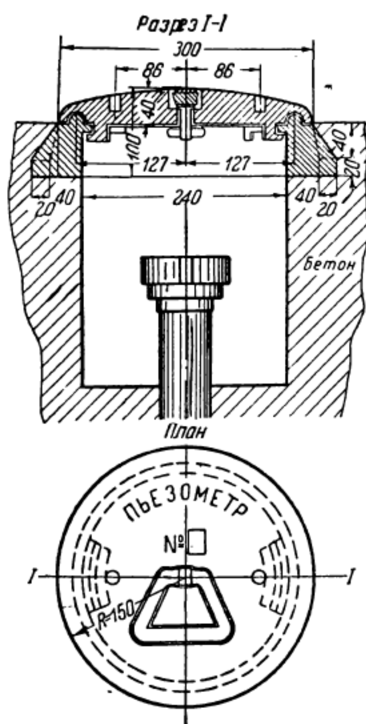


Фиг. 135. Схема расположения пьезометров в бетонных сооружениях

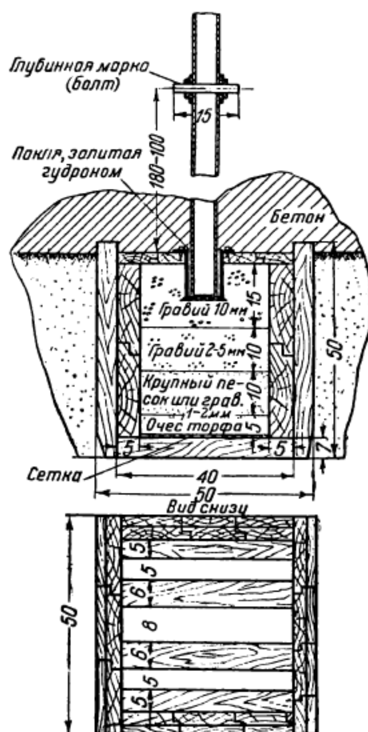
10 *мм*. На сетку внутри ящика укладывались последовательно слоями слабо разложившийся торф, песок и гравий, служащие для предохранения пьезометра от попадания в него мелких частиц грунта, могущих его забить. В последний слой гравия помещался железный стакан с отверстием в дне размером 5 *мм*; стакан прибивался к ящику (фиг. 137). После установки фильтра на место в стакан вводилась пьезометрическая труба, которая закреплялась в строго вертикальном положении; пространство между трубой и стенками стакана тщательно забивалось паклей и заливалось гудроном. После этого начиналось бетонирование основания сооружения (фиг. 135, 136, 137).

6. Для наблюдений за трещинами в бетонных сооружениях, а также за перемещениями отдельных блоков применялись разнообразные маяки, щелемеры и сдвигомеры.

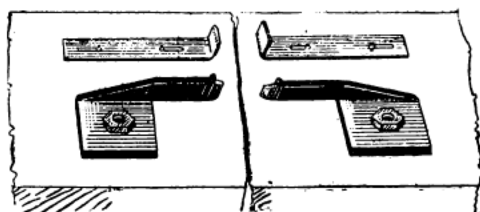
Все применявшиеся конструкции щелемеров были разработаны и изготовлены силами Строительства. Конструкция и принцип работы применявшихся на строительстве канала Москва—Волга маяков-щелемеров и сдвигомеров показаны на приводимых фотографиях (фиг. 139—144).



Фиг. 136. Крышка пьезометра в бетонном сооружении

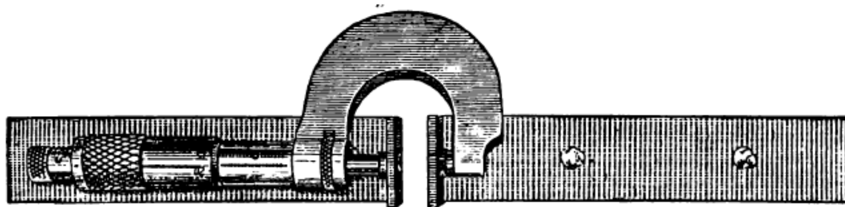


Фиг. 137. Фильтр пьезометра в бетонном сооружении

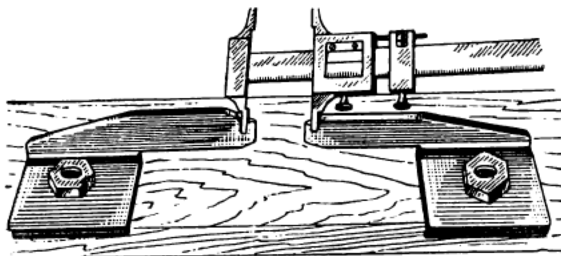


Фиг. 138. Металлические маяки для измерения деформаций бетонных сооружений

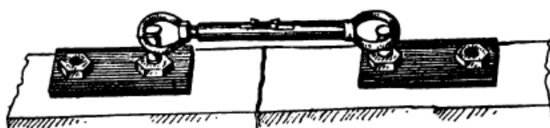
На фиг. 138 и 140 приведены простейшие металлические маяки, состоящие из двух металлических планок с полками различной формы, устанавливаемые по обе стороны исследуемых трещин. Измерение ширины трещины здесь производится при помощи микрометренных винтов или штанген-циркуля, как это наглядно показано на приводимых фотографиях. Несколько более сложной конструкцией является щелемер конструкции инж. А. И. Крылова (фиг. 141 — 144).



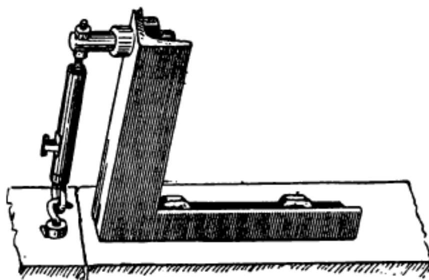
Фиг. 139. Металлический маяк с приложенным к нему микрометром



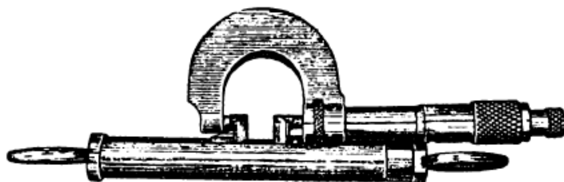
Фиг. 140. Металлический маяк с приложенным к нему штанген-циркулем



Фиг. 141. Щелемер конструкции инж. Крылова



Фиг. 142. Применение щелемера Крылова для измерения осадок бетонных блоков



Фиг. 143. Щелемер Крылова с приложенным к нему микрометром



Цена 1 р. 50 к.